ORSAY
n° d'ordre:

THESE

PRESENTEE A L'UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

PAR

Mohamad Fawaz MOUSSELLY

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR INGENIEUR

ETUDE ET REALISATION D'UN PROTOTYPE DE MESUREUR ABSOLU DE NOMBRES D'ONDES LASER

SOUTENUE LE 22 juin 1982 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

MM.	S. LOWENTHAL	Président
	P. JACQUINOT	Examinateur
	P. BOUCHAREINE	"
	S. LIBERMAN	"
	J. PINARD	"

ORSAY
n° d'ordre:

THESE

PRESENTEE A L'UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

PAR

Mohamad Fawaz MOUSSELLY

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR INGENIEUR

ETUDE ET REALISATION D'UN PROTOTYPE
DE MESUREUR ABSOLU
DE NOMBRES D'ONDES LASER

SOUTENUE LE 22 juin 1982 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

MM.	S. LOWENTHAL	Président
	P. JACQUINOT	Examinateur
	P. BOUCHAREINE	"
	S. LIBERMAN	"
	J. PINARD	"

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION 1

I - PRINCIPE DU SIGMAMETRE 6

II - PRINCIPE DE L'APPAREIL 9

III - CALCUL DES PARAMETRES PRINCIPAUX DE L'APPAREIL 13

A - CALCUL DU POUVOIR DE RESOLUTION DE L'APPAREIL 13

B - CALCUL DU DOMAINE SPECTRAL DES MESURES DE L'APPAREIL 16

IV - DESCRIPTION DE LA PARTIE OPTIQUE DE L'APPAREIL 18

A - LE SPECTROGRAPHE 18

1. La barrette de photodiodes 19

α) Principe du fonctionnement 19

β) Caractéristiques opto-électroniques de la barrette 21

2. Les caractéristiques du disperseur 22

3. Détermination des meilleures conditions d'utilisation du spectrographe 23

α) L'analyse du spectre cannelé 23

β) L'analyse des raies spectrales 26

B - LE SIGMAMETRE 28

1. L'interféromètre ; principe du bloc séparateur de faisceau ; calcul de ses paramètres 28

2. Réalisation et montage des différents éléments du bloc optique : achromatisme 31

3. Adaptation des différentes sources lumineuses à l'interféromètre ; alignement 34

α) le faisceau de lumière blanche 35

β) le faisceau de lumière d'un laser 36

4. Système électronique de détection des signaux optiques donnés par l'interféromètre 37

C - PRESENTATION DE L'ENSEMBLE OPTIQUE DE L'APPAREIL ; COUPLAGE ENTRE LES DIFFERENTS ELEMENTS 39

V - DESCRIPTION DU SYSTEME MICRO-INFORMATIQUE DE L'APPAREIL 43

A - LES FONCTIONS DU MICROPROCESSEUR DANS L'APPAREIL 44

1. Le pilotage du fonctionnement de l'appareil 44

2. La commande du système d'acquisition de données 45

3. Le traitement numérique des données 46

B - LE MATERIEL DU SYSTEME 46

1. L'Unité Centrale 47

α) Le microprocesseur 47

β) Les mémoires 48

2. L'interface d'entrée/sortie, son utilisation dans le pilotage du fonctionnement de l'appareil 48

α) La commande des relais 50

β) Le dialogue entre le système et l'utilisateur ; la commande "start-acquisition" et l'unité d'affichage 50

γ) La commande de l'amplification du signal de la barrette 55

3. Les unités périphériques d'acquisition de données 55

α) Le transfert de données par accès direct à la mémoire : le DMAC 56

β) L'unité périphérique d'acquisition du signal de la barrette de photodiodes 58

γ) Les unités périphériques d'acquisition des signaux $\sin 2\pi\varepsilon$ et $\cos 2\pi\varepsilon$ 60

C - LE PROGRAMME PRINCIPAL ET LES SOUS-PROGRAMMES DE TRAITEMENT NUMERIQUE 61

1. L'organigramme du programme principal 61

2. L'organigramme du sous-programme "EPS" 65

3. L'organigramme du sous-programme "CVBTD" 65

VI - RESULTATS EXPERIMENTAUX 67

CONCLUSION 69

REFERENCES 70

ANNEXE

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547326_0033

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La découverte des lasers à colorant, accordables en fréquences, a permis le développement, depuis une dizaine d'années, de nouvelles méthodes de spectroscopie ainsi que la réalisation d'expériences destinées à étudier l'interaction entre atome et rayonnement. Dans l'un comme dans l'autre cas, on sera toujours amené à accorder la fréquence du laser sur la fréquence de la transition atomique que l'on désire étudier. Cela pose un problème que l'on résout généralement en utilisant monochromateur et lampe spectrale adaptée. Cette opération délicate ne se fait souvent pas sans une part de tâtonnement ; ainsi un bon nombre d'équipes se sont penchées sur le problème de la mesure absolue de la fréquence du rayonnement émis par les lasers accordables.

Nous pouvons rappeler quelles seraient les caractéristiques d'un appareil idéal ; il devrait :

1°/ effectuer des mesures absolues de fréquences (ou de nombre d'ondes ou de longueur d'ondes) avec la précision recherchée dans l'expérience ;

2°/ être en mesure d'être utilisable aussi bien avec des lasers continus qu'avec des lasers fonctionnant en impulsions ; donc, donner des mesures quasi instantanées de la fréquence, ce qui implique que sa détermination ne peut être obtenue par déplacement d'une pièce mobile ;

3°/ permettre l'asservissement et le balayage en fréquence de ces lasers.

Ainsi, un certain nombre d'instruments ont vu le jour. Nous allons rapidement passer en revue les quatre principaux qui permettent d'effectuer des mesures absolues avec des précisions élevées :

1°/ Le lambdamètre {1} dont le principe est basé sur la très ancienne méthode du comptage de franges ; il s'agit d'un interféromètre de Michelson dont on fait varier la différence de marche (D.D.M.). Il est traversé par le faisceau du laser à analyser (de longueur d'onde λ_i) et le faisceau d'un laser de référence (de longueur d'onde λ_r connue). En sortie, les deux faisceaux sont analysés indépendamment par deux détecteurs. Cela permet alors de compter les nombres de franges (N_r, N_i) pour les deux faisceaux et pour la même variation de la D.D.M.

On a alors : $$\lambda_i = \lambda_r \times \frac{N_r}{N_i}$$

Dans les systèmes perfectionnés récemment mis au point, un système électronique permet de mesurer la fraction de frange. N_i est alors un nombre fractionnaire, ce qui permet d'augmenter la précision de l'instrument pour atteindre quelques 10^{-9}. Cependant, il ne peut pas effectuer de mesures instantanées et, par conséquent, il n'est pas adapté à la mesure de la longueur d'onde des lasers fonctionnant en impulsions.

2°/ Le sigmamètre {2}

Nous ne donnerons pas ici son principe qui sera développé dans le chapitre I. Nous dirons simplement que, bien que sensiblement plus complexe que le lambdamètre (il est composé de quatre interféromètres de Michelson de D.D.M. fixes), il remplit toutes les conditions de l'appareil idéal énoncées plus haut. La précision de l'instrument réalisé atteint 10^{-8} ; il peut fonctionner aussi bien avec le rayonnement de sources continues ou pulsées et ceci dans un très large domaine de fréquences, par exemple l'ensemble du domaine visible.

3°/ Le mesureur de longueur d'onde "Wavelength Meter" {3}

Cet instrument est comparable dans ses propriétés au sigmamètre. Il utilise quatre interféromètres de Fabry-Perot de D.D.M. fixes ; les anneaux à l'infini, que donnent ces interféromètres de la source à étudier et d'une source de référence, sont analysés à l'aide d'une barrette de photodiodes. Un micro-ordinateur permet de traiter directement les informations de la barrette, afin de déterminer la longueur d'onde cherchée.

L'instrument réalisé a une précision sensiblement plus faible que les précédents : elle est de 10^{-7} ; d'autre part, l'utilisation d'un interféromètre Fabry-Perot ne permet pas de le rendre parfaitement achromatique dans un grand domaine spectral.

4°/ Le Fizeau Wavemeter {4}

Nous nous attarderons un peu plus longuement sur cet appareil remarquable par sa simplicité. Il utilise un interféromètre de Fizeau, c'est-à-dire composé de deux lames formant un coin d'air. Cet interféromètre étant éclairé à l'aide d'un faisceau laser parallèle, les deux faisceaux

réfléchis interfèrent pour donner un système de franges rectilignes parallèles qui est analysé par une barrette de photodiodes (figure 1). La comparaison du signal sinusoïdal observé pour, respectivement, le rayonnement laser dont on veut mesurer la longueur d'onde λ_i et celui d'un laser de référence λ_r, permet de déterminer λ_i. Ceci se fait en deux temps à l'aide d'un mini-ordinateur. Dans un premier temps, on

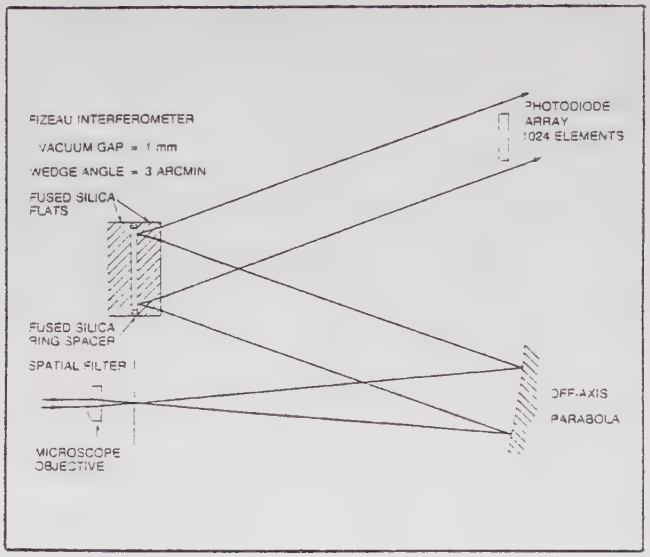


Figure 1

Fizeau Wavemeter

détermine une valeur de λ_i à partir de la période des franges P_i et P_r : $\lambda_i = \lambda_r \frac{P_i}{P_r}$; cette mesure est peu précise, mais permet de calculer l'ordre d'interférence à λ_i. La valeur finale et précise de λ_i est obtenue dans un deuxième temps en comparant les phases respectives du signal de franges pour les longueurs d'ondes λ_i et λ_r. La précision des mesures indiquée par les auteurs est de l'ordre de 10^{-7}.

Cet instrument pose un certain nombre de problèmes associés au fait que les erreurs de phase du signal d'interférence doivent être inférieures

à quelques 10^{-4} sur l'ensemble de la pièce optique dont les dimensions doivent être de l'ordre de plusieurs centimètres.

L'instrument, que nous allons étudier et décrire, est une association d'un spectrographe et d'un sigmamètre comportant un seul interféromètre de différence de marche de 1 mm ; il permet la mesure absolue de nombres d'ondes avec une précision de l'ordre de 0,1 cm^{-1}, précision tout à fait suffisante pour caler un laser (continu ou pulsé) sur une fréquence bien déterminée. Cette précision modeste permet de donner à l'appareil une certaine autonomie ; il n'utilise en outre pas de laser monomode comme référence et comportera son propre système d'étalonnage.

Avant de décrire notre appareil (chapitre IV), nous allons rappeler dans le chapitre I le fonctionnement du sigmamètre. Nous passerons ensuite à la description du principe de l'appareil (chapitre II) et nous en déterminerons les principaux paramètres (chapitre III). Le chapitre IV sera consacré à l'ensemble micro-informatique qui assure le traitement des données et le contrôle du fonctionnement de l'appareil. Nous décrirons finalement, au chapitre VI, quelques expériences tests.

CHAPITRE I

.

PRINCIPE DU SIGMAMETRE

I - PRINCIPE DU SIGMAMETRE

L'élément de base du sigmamètre est un interféromètre de Michelson. Si l'on éclaire l'interféromètre par un faisceau de lumière en ondes planes de nombres d'ondes σ , on recueille en sortie un flux lumineux d'intensité $\frac{I_o}{2}(1 + \cos 2\pi\sigma\delta)$ où δ est la D.D.M. entre les deux bras de l'interféromètre et I_o l'intensité du faisceau entrant. De même, si l'on place dans l'un des bras une lame $\frac{\lambda}{4}$ introduisant ainsi une différence de phase de $\frac{\pi}{2}$ par rapport au chemin optique précédent, on obtiendra un signal de la forme $\frac{I_o}{2}(1 + \sin 2\pi\sigma\delta)$. Ces deux faisceaux sont obtenus simultanément à partir d'un même interféromètre à deux voies.

La figure 2 représente le schéma d'un appareil qui a été effectivement réalisé. L'interféromètre comporte deux parties : un bloc optique relativement complexe et un miroir positionné à une distance $\frac{\delta}{2}$ de la face supérieure du bloc par l'intermédiaire de cales en Invar.

Comme le montre la figure, le bloc optique est monté à partir de plusieurs pièces préalablement traitées, puis assemblées entre elles par adhérence moléculaire sous contrôle interférométrique. Cet ensemble joue de multiples rôles :

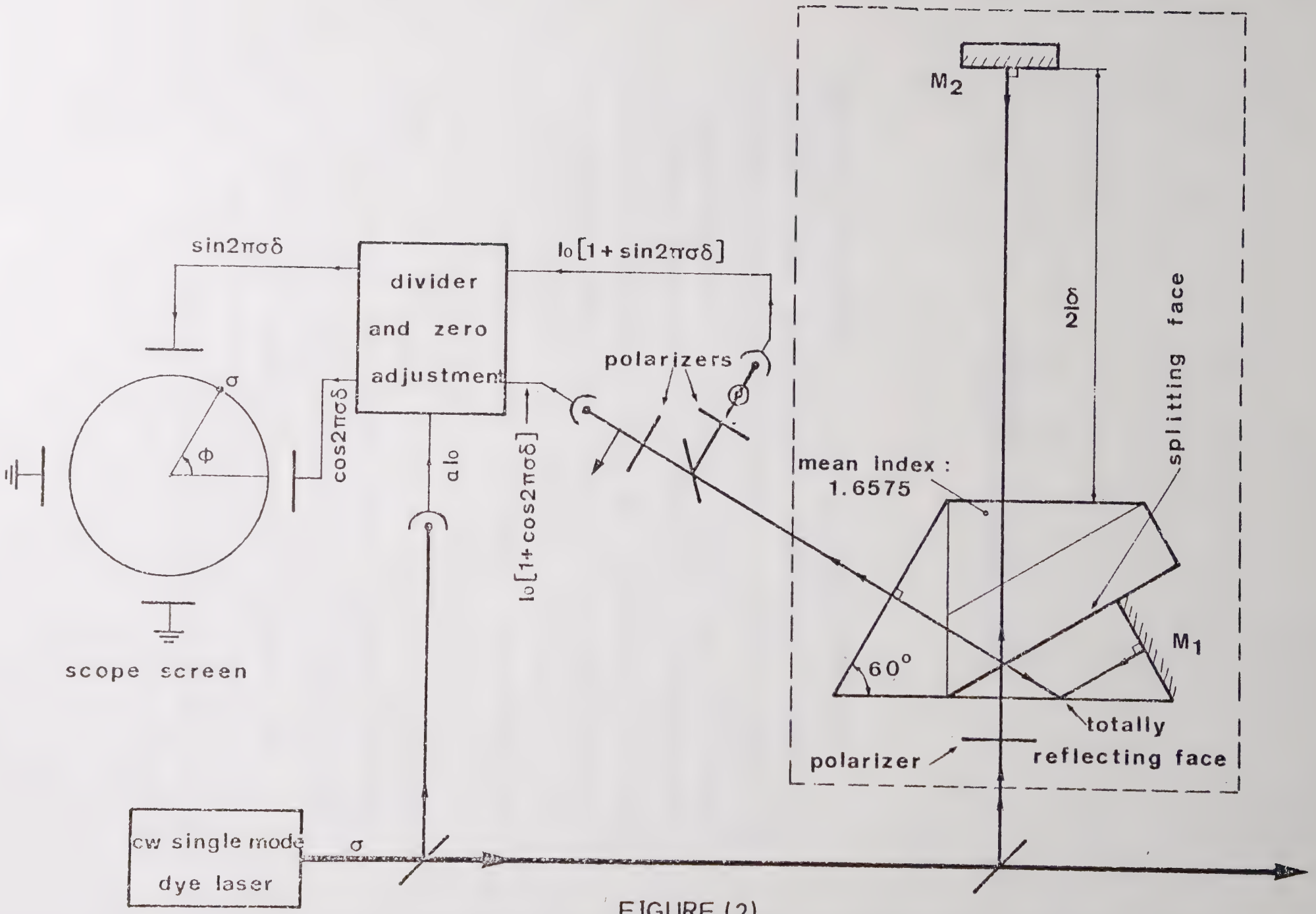

sin2πσδ
divider
and zero
adjustment
Io[1+sin2πσδ]
polarizers
σ
Φ
cos2πσδ
a Io
Io[1+cos2πσδ]
scope screen
M2
2lδ
splitting face
mean index :
1.6575
M1
60°
totally
polarizer
reflecting face
cw single mode
dye laser
σ

FIGURE (2)

a) une de ses faces internes est utilisée comme séparatrice de faisceau ;

b) une autre face est utilisée comme miroir ;

c) il comporte, dans un des bras, une face sur laquelle le faisceau vient se réfléchir totalement. Cette réflexion totale a pour but d'introduire entre les deux composantes du faisceau polarisées perpendiculairement et parallèlement au plan d'incidence, un déphasage de $\phi_{//} - \phi_{\perp} = \frac{\pi}{4}$ quasiment indépendant de la longueur d'onde.

Le faisceau entrant dans l'interféromètre est polarisé à 45° du plan de la figure. En sortie, chacune de ses composantes $I_{//}$ et $I_{\perp}$ est analysée indépendamment par deux détecteurs. On obtiendra ainsi les deux signaux recherchés :

$$I_{//} = \frac{I'}{2} (1 + \cos 2\pi\sigma\delta + 2\phi_{//})$$

$$\text{et} \quad I_{\perp} = \frac{I_o}{2} (1 + \sin 2\pi\sigma\delta + 2\phi_{//})$$

Ils subissent ensuite un traitement électronique simple, afin de les réduire à deux signaux électriques respectivement proportionnels à $\cos 2\pi\sigma\delta + 2\phi_{//}$ et $\sin 2\pi\sigma\delta + 2\phi_{//}$, lesquels, portés sur les plaques horizontales et verticales d'un oscilloscope, donnent un spot qui décrit un cercle complet lorsque le nombre d'ondes σ varie d'une quantité égale à $\frac{1}{\delta}$ et dont l'argument ϕ, en prenant comme origine $2\phi_{//}$, donne directement la valeur de $2\pi\sigma\delta$; ainsi, connaissant δ, on peut déduire de cet argument σ modulo $\frac{1}{\delta}$.

Le principe d'un appareil de mesure de σ est alors évident : si l'on considère plusieurs interféromètres de D.D.M. respectivement et

rigoureusement égale à 0,1, 1, 10 et 100 cm, comme un compteur, la lecture de chacun des arguments correspondants ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 et ϕ_4 donnera les chiffres des unités, des dizièmes, des centièmes et des millièmes du nombre d'ondes σ exprimé en cm^{-1}, avec une indétermination de $K \times 10\ cm^{-1}$ qui peut être aisément levée à l'aide d'un modeste spectromètre à réseau. La précision ultime d'un tel instrument est donnée par la précision avec laquelle on peut effectuer la mesure de ϕ ; cette mesure est effectuée couramment avec une précision de $\frac{2\pi}{100}$; ce qui, dans l'appareil précédent, représente une précision de mesure de $10^{-4}\ cm^{-1}$.

Dans l'appareil qui a effectivement été réalisé, les quatre D.D.M. ne sont pas rigoureusement égales à 0,1, 1, 10 et 100 cm. L'appareil nécessite donc un étalonnage préalable qui consiste à mesurer chacune des D.D.M. avec une grande précision ; ceci ne peut être réalisé que par l'utilisation de plusieurs sources de références de nombres d'ondes connus avec une précision meilleure que celle recherchée par l'instrument et d'une méthode d'excédent fractionnaire. L'utilisation de telles sources, qui sont elles-mêmes complexes, rend l'appareil (comme tout appareil destiné à effectuer des mesures très précises) d'un maniement relativement délicat.

Il est en fait montré que bon nombre de mesures (surtout utilisant des lasers fonctionnant en impulsion) ne nécessitent pas de grandes précisions. C'est pour cette raison que nous avons entrepris la réalisation de l'instrument qui est décrit dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II

PRINCIPE DE L'APPAREIL

II - PRINCIPE DE L'APPAREIL

Comme nous l'avons dit dans l'introduction, notre appareil possède comme élément de base un sigmamètre. Cependant, comme nous l'avons également fait remarquer, le sigmamètre ne peut à lui seul effectuer une mesure complète de nombre d'ondes, mais seulement en donner les derniers chiffres significatifs, c'est-à-dire : si, par exemple, la différence de marche de l'interféromètre (constituant le sigmamètre) est de 1 cm, l'instrument donnera uniquement les chiffres des dizièmes et des centièmes de cm^{-1}. Il faut alors lui adjoindre un instrument de type classique pour avoir les premiers chiffres et compléter ainsi la mesure ; ainsi donc notre ensemble comportera également un petit spectromètre à réseau. Mais afin de conserver à l'appareil son caractère fondamental de mesureur instantané de nombre d'ondes, celui-ci est du type spectrographe : un spectromètre multicanal, utilisant comme détecteur une barrette de photodiodes. Cette barrette a comme propriété de mémoriser instantanément l'ensemble du spectre par intégration du flux lumineux correspondant à chaque élément spectral, tout comme le ferait une plaque photographique.

Bien évidemment, l'ensemble des informations données d'une part par la barrette et d'autre part par le sigmamètre n'est pas directement

exploitable. Nous avons donc été amenés à élaborer un système d'acquisition et de traitement de données basé sur l'utilisation d'un microprocesseur.

En conclusion, l'appareil est constitué de trois éléments principaux :

1°/ un sigmamètre, constitué d'un seul interféromètre de Michelson,

2°/ un spectrographe, muni d'un réseau linéaire de photodiodes,

3°/ un système micro-informatique.

Nous allons voir maintenant comment un couplage astucieux de ces différents éléments permet leur étalonnage pour, finalement, aboutir à une mesure absolue de nombres d'ondes.

La figure 3 montre le schéma de principe du fonctionnement de l'appareil ; chacun des éléments ci-dessus cités y est représenté. Afin d'effectuer une mesure, le faisceau lumineux d'un laser de nombre d'ondes σ_L inconnu est envoyé simultanément dans le sigmamètre et le spectrographe. Tout d'abord, le sigmamètre, comme nous l'avons vu dans l'introduction, nous permet de mesurer ce nombre d'ondes modulo $\frac{1}{\delta}$; on a alors :

$$\sigma_L = \frac{1}{\delta} (N_L + \varepsilon_L)$$

où N_L est un nombre entier à déterminer et ε_L l'excédent fractionnaire directement donné par les signaux sin et cos qui en sont issus. Ensuite le spectrographe, en nous donnant une mesure σ'_L de précision modeste mais toutefois suffisante, nous permet de déterminer sans ambiguïté le nombre entier N_L par l'examen du produit $\sigma'_L . \delta$ en tenant

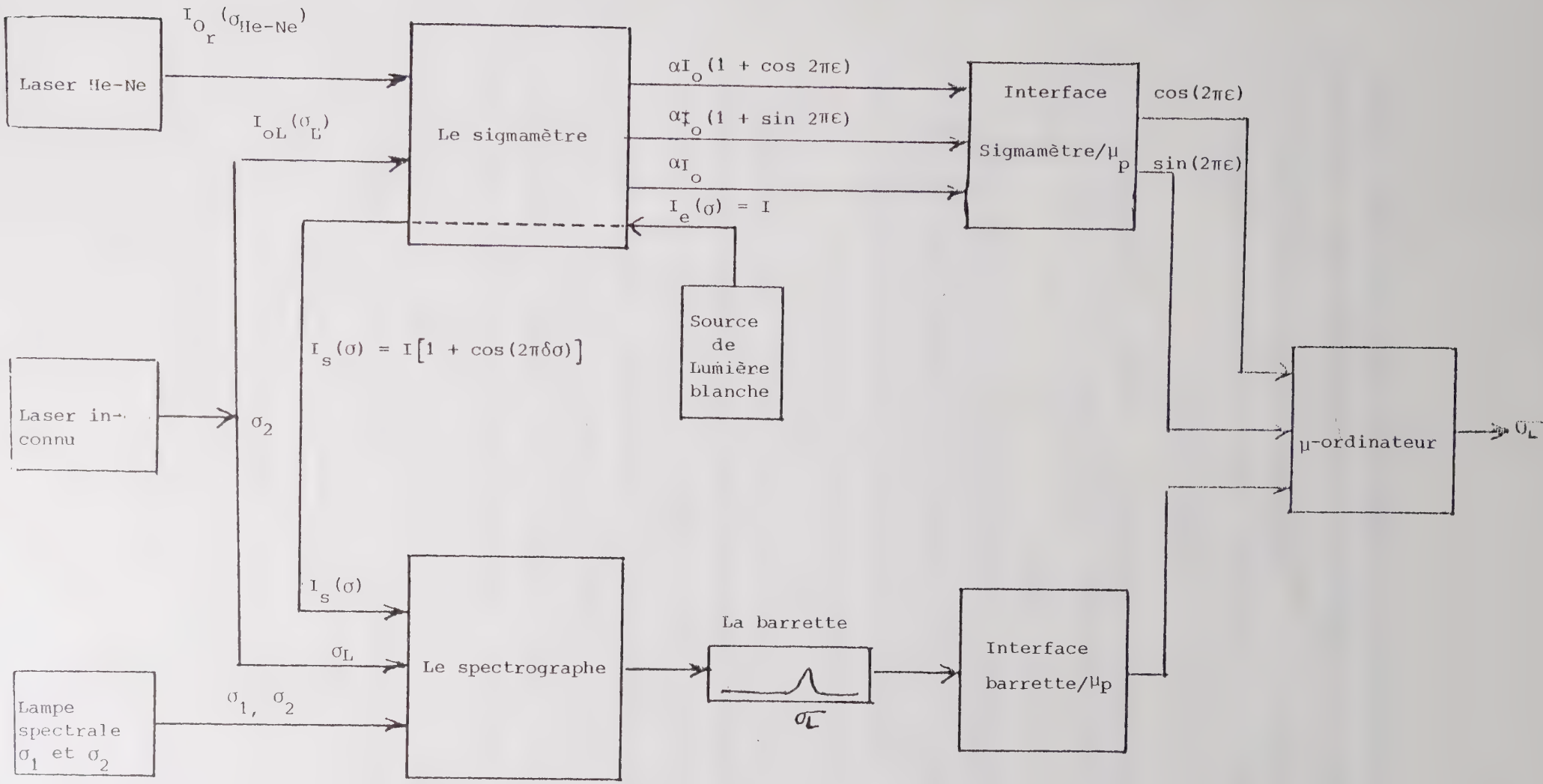


Figure 3

Schéma de principe du fonctionnement de l'appareil.

compte de la valeur de ε_L . Comme nous pouvons le constater, la mesure de σ_L nécessite la connaissance, avec une bonne précision, de la différence de marche δ de l'interféromètre ainsi qu'un étalonnage relativement précis du spectrographe, c'est-à-dire une détermination sur la barrette d'une échelle de nombres d'ondes.

Cette opération d'étalonnage est réalisée à l'aide de trois sources lumineuses de références : une lampe spectrale, une source de lumière blanche et une source laser.

La lampe spectrale, dont la lumière ne traverse que le spectrographe, est choisie de façon à donner deux raies de nombres d'ondes σ_1 et σ_2 telles qu'elles permettent d'étalonner la barrette de photodiodes en deux points situés proches de ses extrémités.

La lumière provenant de la source blanche, elle, par contre, traverse d'abord l'interféromètre avant d'être analysée par le spectrographe. On obtient alors sur la barrette un spectre cannelé. La période des cannelures est définie par l'interféromètre ; elle est égale à $\Delta\sigma = \frac{1}{\delta}$ et est constante dans tout le spectre, pourvu que l'interféromètre soit parfaitement achromatique. Ces cannelures permettent d'obtenir sur la barrette une échelle parfaitement linéaire en nombres d'ondes.*

D'autre part, en mesurant le nombre de cannelures situées entre les deux raies de référence σ_1 et σ_2, nous obtenons une prémesure de la différence de marche de l'interféromètre $\delta' \approx \frac{N}{\sigma_2 - \sigma_1}$

---

* Cette échelle nous permet d'avoir un étalonnage beaucoup plus sûr que ne le serait celui déterminé à partir de la seule loi de dispersion du spectrographe et d'une raie de référence.

La source laser He-Ne ne traverse que le sigmamètre ; celui-ci délivre alors une mesure de l'excédent fractionnaire ε_r , d'où l'on obtient la différence de marche modulo $\frac{1}{\sigma_r}$:

$$\delta = \frac{1}{\sigma_r} (N_r + \varepsilon_r)$$

La mesure complète de δ est effectuée à partir de la prémesure δ' qui permet de déterminer le nombre entier N_r.

Toutes les opérations ci-dessus énumérées sont effectuées par le micro-ordinateur qui permet à tout instant d'effectuer ou de contrôler l'étalonnage de l'appareil et de calculer les nombres d'ondes.

CHAPITRE III

CALCUL DES PARAMETRES PRINCIPAUX DE L'APPAREIL

III - CALCUL DES PARAMETRES PRINCIPAUX DE L'APPAREIL

Dans ce chapitre, nous allons déterminer deux paramètres principaux de l'appareil : son pouvoir de résolution et le domaine spectral de mesure.

Les valeurs de ces deux paramètres sont en fait limitées, comme nous allons le voir, par le nombre des éléments de la barrette de photodiodes que nous avons utilisée dans le spectrographe ; ce nombre est égal à 2048.

A - CALCUL DU POUVOIR DE RESOLUTION DE L'APPAREIL

Le fait que la précision des mesures de l'appareil est celle de son sigmamètre, la détermination du pouvoir de résolution se ramène au choix de la différence de marche δ de l'interféromètre du sigmamètre : en effet, l'incertitude $\Delta\sigma$ des mesures de l'appareil est égale à $\frac{\Delta\varepsilon}{\delta}$ où $\Delta\varepsilon$ étant l'incertitude sur les mesures de l'excédent fractionnaire ε. Nous avons alors :

$$R = \frac{\sigma}{\Delta\sigma} = \frac{\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot \delta$$

Cette relation montre que, afin d'augmenter le pouvoir de résolution, il nous suffit d'augmenter la différence de marche δ , mais comme nous l'avons remarqué dans le principe de l'appareil, l'étalonnage nécessite une mesure précise de cette différence de marche. Cette mesure précise n'est possible que pour des valeurs de δ inférieures à une certaine valeur δ_{max} que nous allons calculer maintenant.

Nous avons vu dans le deuxième chapitre que la mesure de δ est effectuée en deux étapes : d'abord l'utilisation d'un laser He-Ne de référence permet de calculer δ modulo $\frac{1}{\sigma_{He-Ne}}$; cette indétermination sur δ est levée ensuite par une autre mesure δ' de δ , effectuée cette fois par le spectrographe. Et ceci n'est possible que si l'incertitude $\Delta\delta'$ sur la mesure de δ' est inférieure à $\frac{1}{\sigma_{He-Ne}}$. Nous demandons donc au spectrographe, par une analyse du spectre cannelé enregistré sur la barrette, de pouvoir différencier deux différences de marche voisines d'une longueur d'onde λ_{He-Ne}. Nous avons admis et vérifié expérimentalement que ceci était réalisé lorsque le nombre de cannelures comptées entre deux raies de références situées à l'une et l'autre extrémité du spectre dispersé sur la barrette varie alors d'une quantité égale au quart de la période à condition toutefois que cette variation corresponde au moins à un élément de la barrette. Cette condition a pour conséquence de définir la différence de marche maximum de l'interféromètre par la relation :

$$\delta \leq N \quad \lambda_{He-Ne} = \delta_{max}$$

où N est le nombre d'éléments de la barrette entre les deux raies de références (au maximum 2048).

Pour démontrer cette relation, nous devons tenir compte du fait que la dispersion du spectre sur la barrette de photodiodes n'est pas linéaire en nombre d'ondes et que de ce fait les cannelures ont une période assez fortement variable ; elle est par contre approximativement linéaire en longueur d'onde. Il suffit alors de calculer indépendamment pour λ_{min} et λ_{max} (correspondant aux deux raies de références) les variations de l'ordre d'interférences pour deux différences de marche δ et $\delta + \lambda_{He-Ne}$

Pour λ_{min} on a :

$$\delta = \lambda_{min} \cdot P_{min} \qquad \text{(P fractionnaire)}$$

et par différenciation on obtient :

$$\Delta P_{min} = \frac{\Delta\delta}{\Delta_{min}} = \frac{\lambda_{He-Ne}}{\lambda_{min}}$$

Exprimée en longueur d'onde, cette variation correspondra à :

$$\Delta\lambda_{min} = \frac{\lambda^2_{min}}{\delta} \quad \Delta P_{min} = \frac{\lambda_{He-Ne} \cdot \lambda_{min}}{\delta}$$

où $\frac{\lambda^2_{min}}{\delta}$ est la période des cannelures au voisinage de λ_{min}.

De même pour λ_{max}, on aura :

$$\Delta\lambda_{max} = \frac{\lambda_{He-Ne} \lambda_{max}}{\delta}$$

la variation enregistrée sera alors :

$$\Delta\lambda_{max} - \Delta\lambda_{min} = \frac{\lambda_{He-Ne}}{\delta} (\lambda_{max} - \lambda_{min})$$

Comme il y a une correspondance linéaire entre les longueurs d'ondes et les éléments de la barrette,

à $\lambda_{max} - \lambda_{min}$ on peut faire correspondre le nombre total d'éléments N de la barrette,

et $\Delta\lambda_{max} - \Delta\lambda_{min}$ devra alors correspondre à au moins un élément, d'où la relation :

$$\delta_{max} = \lambda^{N}_{He-Ne}$$

Pour une barrette comprenant 2048 photodiodes (le maximum que l'on puisse trouver chez les constructeurs) et sachant que la longueur d'onde de la raie de référence est : 633 nm (laser He-Ne), nous obtenons une différence de marche maximum de l'ordre de 1,3 mm. Nous avons donc fixé la différence de marche de l'interféromètre à 1 mm.

Ce paramètre étant fixé, il déterminera le pouvoir de résolution de l'appareil qui sera égal à $1.6\ 10^{5}$ $\left[\text{la relation } R = \frac{\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot \delta, \text{ pour } \lambda = 625\ \mu\ (\sigma = 1,6\ 10^{4}\ cm^{-1}) \text{ et } \Delta\varepsilon = 10^{-2}\right]$

B - CALCUL DU DOMAINE SPECTRAL DES MESURES DE L'APPAREIL

Ce paramètre est important pour la définition du spectrographe à utiliser ; son calcul se base sur la connaissance de la différence de marche δ de l'interféromètre que nous venons de fixer à 1 mm. En effet, pour un tel interféromètre, la période des cannelures pour la longueur minimum du spectre est $\frac{\lambda^{2}_{min}}{\delta}$; si nous considérons qu'un échantillonnage de ~ 4 points est nécessaire pour définir chaque période, le pas de la

barrette devra correspondre à $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2_{min}}{4\delta}$ d'où le spectre enregistré

$$\lambda_{max} - \lambda_{min} = N \frac{\lambda^2_{min}}{4\delta} \sim 500 \frac{\lambda^2_{min}}{\delta}$$

ce qui donne pour $\lambda_{min} = 550$ nm

$$\lambda_{max} - \lambda_{min} = 151{,}25 \text{ nm}$$

Nous pouvons donc couvrir le spectre de 550 nm à 700 nm, ce qui correspond aux longueurs d'ondes données par un laser à colorant fonctionnant avec l'ensemble des rhodamines (560 - 580 - 610 et 640).

Nous pouvons également vérifier qu'une variation de la différence de marche λ_{He-Ne} entraîne une variation du nombre de franges d'une quantité égale à un quart. En effet, nous avons :

$$\Delta P_{max} - \Delta P_{min} = \lambda_{He-Ne} \left(\frac{1}{\lambda_{max}} - \frac{1}{\lambda_{min}}\right) \sim 0.25$$

CHAPITRE IV

DESCRIPTION DE LA PARTIE OPTIQUE DE L'APPAREIL

IV - DESCRIPTION DE LA PARTIE OPTIQUE DE L'APPAREIL

Dans ce chapitre, nous décrirons successivement et indépendamment les deux éléments principaux de l'appareil : le spectrographe et le sigmamètre.

Nous en donnerons les caractéristiques et définirons leurs conditions d'utilisation. Ce n'est qu'ensuite que nous décrirons l'ensemble de ces deux éléments couplés.

A - LE SPECTROGRAPHE

Le type de spectrographe que nous avons choisi est un spectrographe à réseau holographique concave à champ plan qui a été conçu tout spécialement en vue d'une utilisation avec un détecteur multicanal tel qu'une barrette plane de photodiodes ou un tube vidicon. Ce réseau donne de la fente d'entrée un spectre étalé sur une surface rigoureusement plane coïncidant avec le plan du détecteur. Ce type de spectrographe a aussi l'avantage d'avoir un montage optique très simple, composé uniquement d'un réseau, d'une fente et de la barrette de photodiodes.

Compte tenu de l'influence prépondérante des caractéristiques de la barrette de photodiodes sur celles du spectrographe, nous allons commencer ce paragraphe par la description de cette barrette.

1. La barrette de photodiodes

Il s'agit d'un réseau linéaire composé de 2048 photodiodes équidistantes (modèle RL2048H de chez RETICON). La figure 4 représente la géométrie des éléments photosensibles. La surface de chaque photodiode élémentaire est un rectangle de 7 µ de largeur sur 300 µ de hauteur. Le pas est de 15 µ ce qui donne à l'ensemble une dimension totale de 300 µ x 30,72 mm.

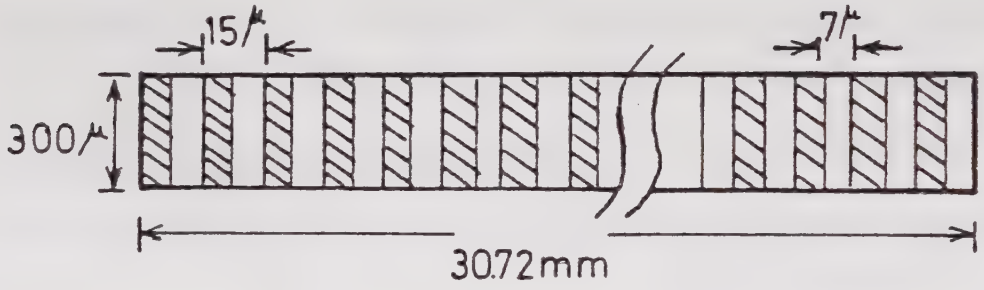


Figure 4

Chaque photodiode fait partie d'un circuit intégré qui permet de traiter son signal. Ce circuit permet également de sortir chacune des 2048 informations sous forme séquentielle, comme nous le verrons dans le sous-paragraphe suivant :

α) *Principe du fonctionnement*

La figure 5 représente un schéma électrique de principe équivalent de la barrette. Les capacités c de ce schéma, placées en parallèle avec les photodiodes sont initialement chargées ; si la barrette

est éclairée par un rayonnement quelconque, ces capacités redéchargeront alors avec une vitesse proportionnelle au flux lumineux reçu par les photodiodes correspondantes.

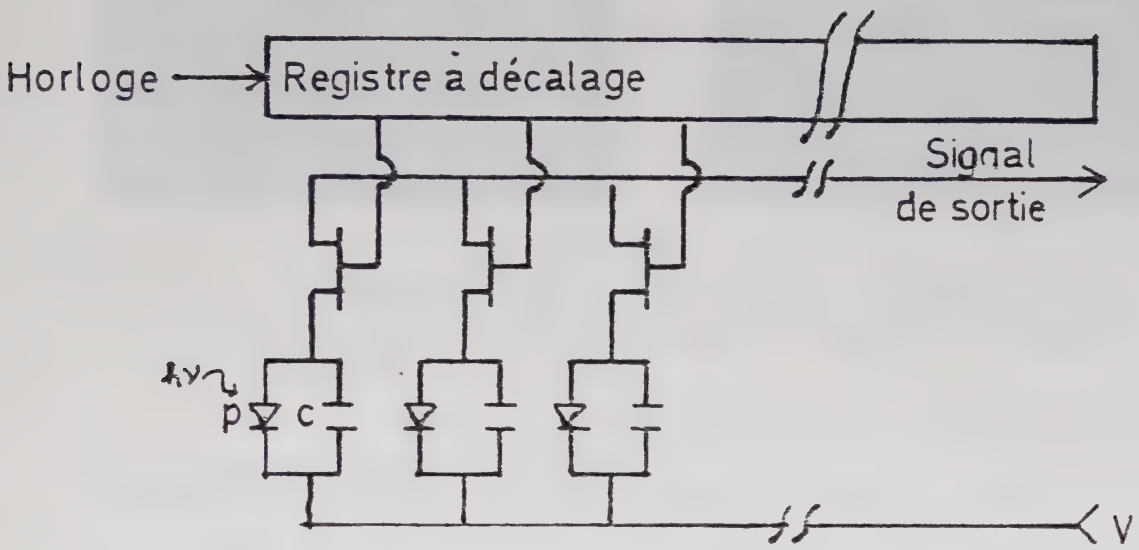


Figure 5

Schéma électrique du principe de la barrette de photodiodes.

Un registre à décalage permet de recharger successivement et périodiquement chaque capacité (donc de lire la charge perdue par chaque capacité). On obtient alors un signal de recharge proportionnel à l'énergie lumineuse reçue par le détecteur pendant l'intervalle de temps entre deux lectures. La photo 1 représente ce signal de recharge tel qu'on peut l'observer en sortie de la barrette sur l'écran de l'oscilloscope. Ce signal est ensuite échantillonnné et bloqué, afin de pouvoir le traiter digitalement.

Dans ces conditions, nous pouvons considérer la barrette comme une plaque photographique dont le grain g est égal à 15 µ (g étant par

définition la limite de résolution de l'émulsion de la plaque).

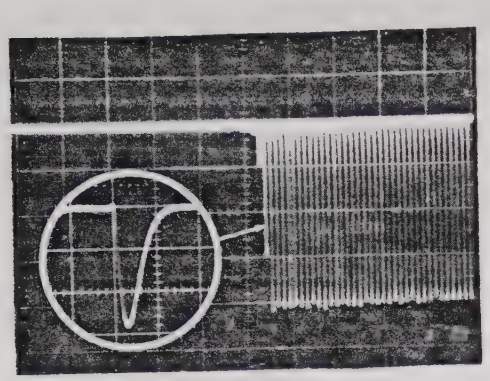


Photo 1

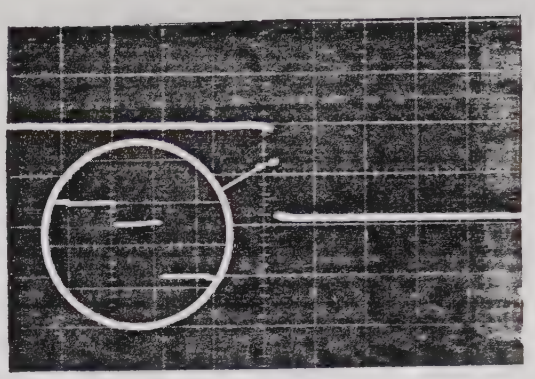


Photo 2

β) *Caractéristiques opto-électroniques de la barrette*

La figure 6 montre la réponse spectrale relative des photodiodes en fonction de la longueur d'onde. Par rapport à d'autres photodiodes de même type (Jonction P-N de Silicon), celles-ci maintiennent une bonne réponse jusqu'à la fin de la région bleue du spectre visible. La figure 7 représente la sensibilité de ces photodiodes présentée ici par la charge électrique que l'on a en sortie pour chaque élément en fonction de l'éclairement. Notons enfin que l'amplitude du signal de chaque élément présente une fluctuation dont la racine carrée de l'écart quadratique moyen est égale à 1/1000 de la valeur maximum de cette amplitude.

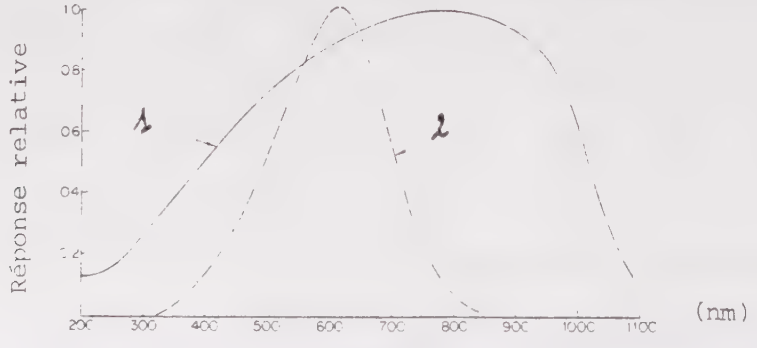


Figure 6

1) La réponse spectrale relative des éléments de la barrette en fonction de la longueur d'onde

2) Répartition spectrale relative d'une source lumineuse de test.

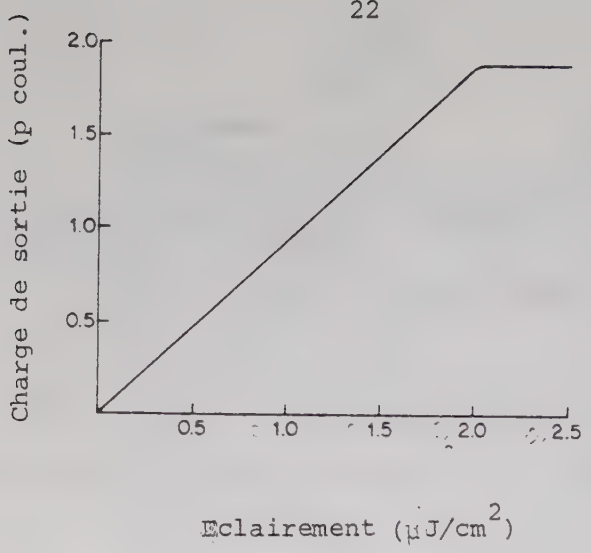


Figure 7

Le signal de charges par cellule en fonction de l'éclairement produit par la source de lumière dont la répartition spectrale est représentée sur la figure 6.

2. Les caractéristiques du disperseur

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la largeur du domaine spectral que l'appareil peut analyser par le spectrographe est égale à ~ 150 nm.

Ce domaine spectral est divisé par les photodiodes de la barrette en petits éléments spectraux ; chacun d'eux est égal à 0,78 Å. Cette valeur 0,78 Å représente l'élément spectral minimum résolu du spectrographe.

Compte tenu de ces données et des possibilités de réalisation des réseaux holographiques concaves à champ plan, nous avons monté sur notre appareil un réseau étudié et réalisé par INSTRUMENTS S.A. (J. Yvon) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Diamètre du réseau : 50 mm
- Nombre de traits/mm : 400
- Distance fente d'entrée - réseau : 308 mm
- Hauteur de fente : 0.3 mm
- Distance réseau - spectre : 460 mm

. Domaine spectral : 540-700 nm

. Longueur du spectre : 30.72 mm (fixée par la largeur de la barrette)

. Flux diffracté (ordre 1) : 30 à 50 % pour λ = 5400 - 7000 Å

Monté dans les conditions représentées par la figure 8, ce réseau donne une résolution de 0.9 Å dans la région spectrale choisie 540-700 nm en utilisant une fente d'entrée de largeur 9 µm.

3. Détermination des meilleures conditions d'utilisation du spectrographe

Comme nous l'avons vu dans le principe de l'appareil, ce spectrographe est destiné à analyser d'une part des spectres de raies provenant soit d'une lampe spectrale, soit de laser, d'autre part un spectre cannelé provenant d'une source de lumière blanche dont le faisceau traverse préalablement l'interféromètre. En fait, ce sera ce dernier cas qui déterminera les meilleures conditions d'utilisation du spectrographe. Ainsi allons-nous l'analyser en premier, puis nous donnerons des exemples des signaux obtenus à l'aide des sources des raies.

α) *L'analyse du spectre cannelé.*

La photo 3 représente un oscillogramme typique de spectre cannelé vu par la barrette de photodiodes. L'écart entre les cannelures est ici de l'ordre de 10 cm^{-1}. Notre problème est de déterminer les positions du maximum de chaque cannelure par rapport à l'ensemble des éléments de la barrette. Il est évident que cette détermination est meilleure quand l'amplitude de la modulation du spectre cannelé est maximum. Cette amplitude de modulation est fonction de la largeur de la fente d'entrée, c'est-à-dire de la résolution $\Delta\sigma_R$ du spectrographe ; il faudra alors, comme dans tout spectrographe, chercher le meilleur compromis entre luminosité et résolution.

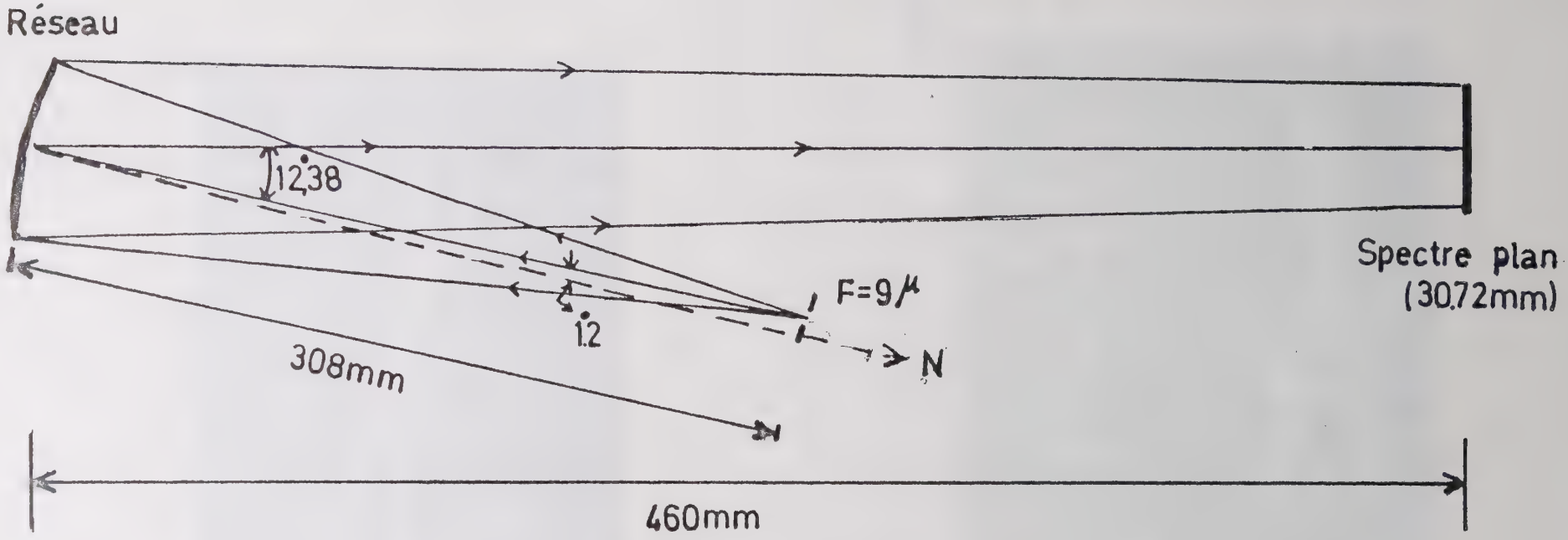


FIGURE (8)

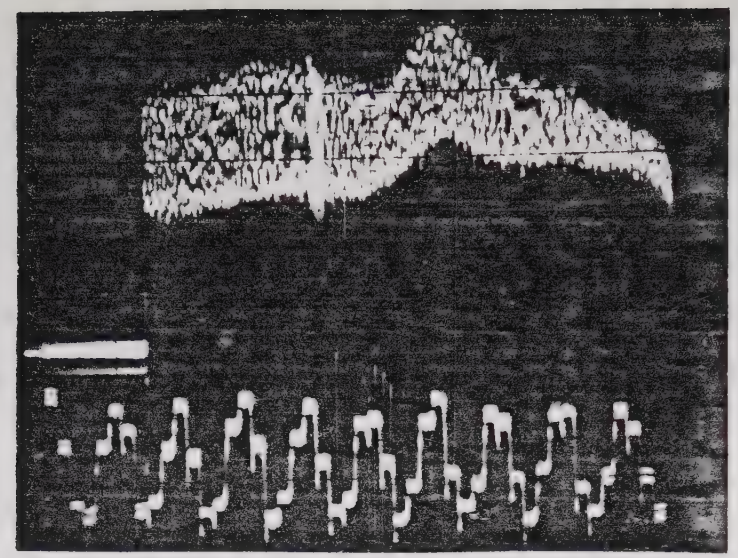


PHOTO 3

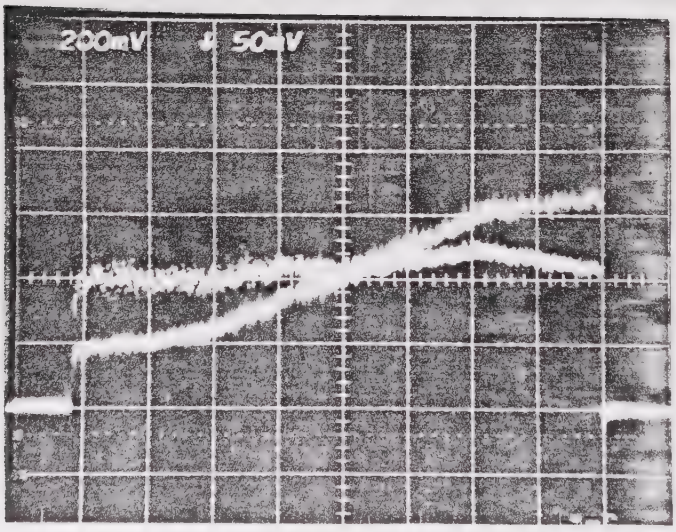


PHOTO 4

Afin de simplifier le calcul de cette amplitude (mais bien sûr sans une perte importante de précision), nous pouvons négliger l'effet de la diffraction due au réseau par rapport à l'effet de la largeur de la fente d'entrée sur la valeur de $\Delta\sigma_R$.

Dans ces conditions, il suffit pour effectuer ce calcul de considérer le produit de convolution entre la fonction $(1 + \cos 2\Delta\delta\sigma)$ représentant la variation de la brillance spectrale du spectre cannelé et la fonction $\text{Rect}\left[\frac{\sigma}{\Delta\sigma_R}\right]$ représentant la brillance au niveau de la barrette quand le spectrographe est éclairé par un rayonnement monochromatique. Nous trouvons :

$$F(\sigma) = (1 + \cos 2\pi\delta\sigma) * \text{Rect}\left(\frac{\sigma}{\Delta\sigma_R}\right)$$

$$= \int_{\sigma-\frac{\Delta\sigma_R}{2}}^{\sigma+\frac{\Delta\sigma_R}{2}} (1 + \cos 2\pi\delta\sigma)\ d\sigma'$$

$$F(\sigma) = \Delta_R^{\sigma}\left[1 + \frac{\sin(\pi\delta\ \Delta\sigma_R)}{\pi\delta\ \Delta\sigma_R}\ \cos 2\pi\delta\sigma\right]$$

D'où nous calculons l'amplitude modulation $\Delta F = F_{max}(\sigma) - F_{min}(\sigma)$. Nous trouvons :

$$\Delta F = \frac{2}{\pi\delta}\ \sin(\pi\delta\Delta\sigma_R)$$

qui est maximum pour $\pi\delta(\Delta\sigma_R) = \frac{\bar{\Lambda}}{2}$, c'est-à-dire pour

$$\Delta\sigma_R = \frac{1}{2\delta}$$

Pour cette valeur, le contraste c défini par $\frac{F_{max} - F_{min}}{F_{max} + F_{min}}$ est égal à 66 %.

Le signal mesuré à la sortie de la barrette sera en fait la convolution de $F(\sigma)$ par une fonction rectangle $\mathrm{Rect}(\frac{\sigma}{\Delta\sigma_d})$ représentant la dimension transversale de chaque détecteur, échantillonné ensuite avec un pas variable en nombre d'ondes (la dispersion du réseau étant approximativement linéaire en longueur d'onde) de l'ordre de ($2{,}6\ cm^{-1}$) dans le pire des cas, c'est-à-dire du côté bleu du spectre. L'opération de convolution par un créneau dont la largeur est de, au maximum, $1{,}3\ cm^{-1}$ c'est-à-dire $\approx \frac{1}{8}$ de la période, n'apporte pas de diminution sensible du contrate des franges ; par contre, l'échantillonnage a pour effet de moduler légèrement l'amplitude du signal obtenu sur l'oscilloscope.

La source de lumière blanche que nous avons choisie pour former ce spectre possède une brillance spectrale $B(\lambda)$ variable approximativement linéairement dans le domaine spectral 540-700 nm (voir figure 9). Cette variation est amplifiée par la réponse spectrale des photodiodes de la barrette dont la courbe est montrée sur la figure 6.

Afin de compenser cette variation, nous avons réalisé un amplificateur pour le signal de la barrette, à gain variable. Le résultat de cette compensation est montré sur la photo 4. Cet amplificateur sera décrit ultérieurement.

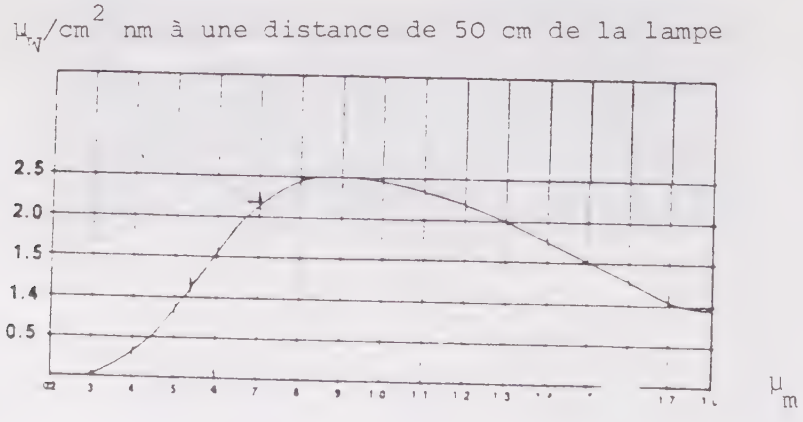


Figure 9

Le flux total pour une lampe (100 W, 3200° K)

β) *L'analyse des raies spectrales*

La photo 5 représente le signal de la barrette de photodiodes pour la raie $\lambda = 6099,14$ du Cd. Compte tenu de la finesse de cette raie, ce signal permet de déterminer la largeur à mi-hauteur de la fonction d'appareil du spectrographe. La photo montre que cette largeur est < 2.5 éléments, c'est-à-dire < 2 Å.

Pour déterminer la position du maximum d'une telle raie ou d'une cannelure, nous avons considéré que celle-ci peut être approximée au voisinage du sommet par un polynome de deuxième degré :

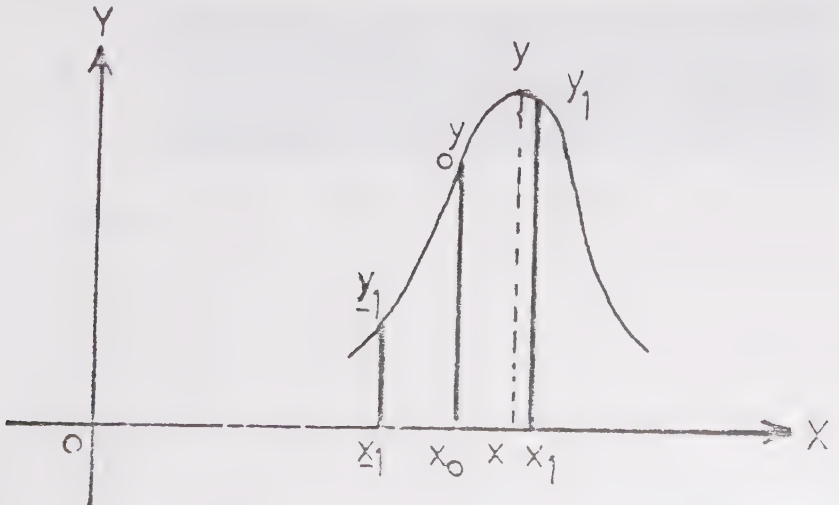
$$y - y_o = A + B\ (x - x_o)^2$$

telle que l'abscisse du maximum représente la position de la raie par rapport à l'origine x_o.

Si nous déterminons les trois ordonnées y_{-1}, y_o et y_1 telle que l'abscisse x du maximum soit entre x_{-1} et x_1 (figure 10). il est facile alors de montrer que l'abscisse x est donnée par la relation :

$$x - x_o = \frac{y_{+1} - y_{-1}}{2(y_{+1} - 2\ y_o + y_{-1})}$$

en supposant que le pas entre les échantillons y_i est égal à l'unité.



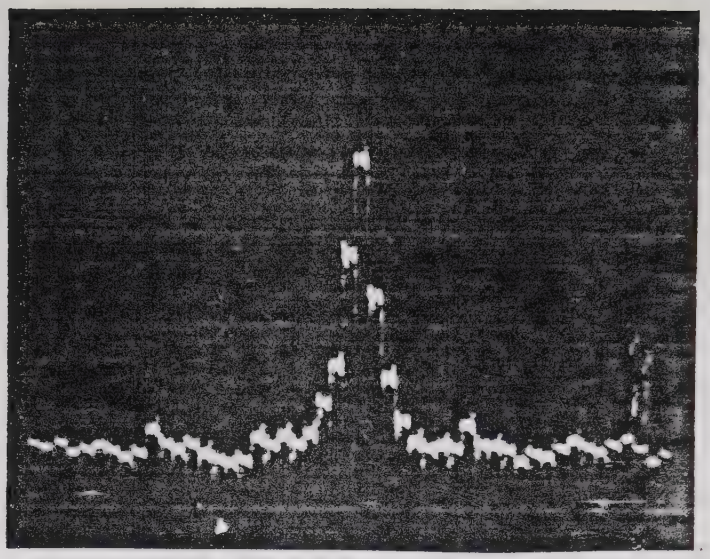


PHOTO 5

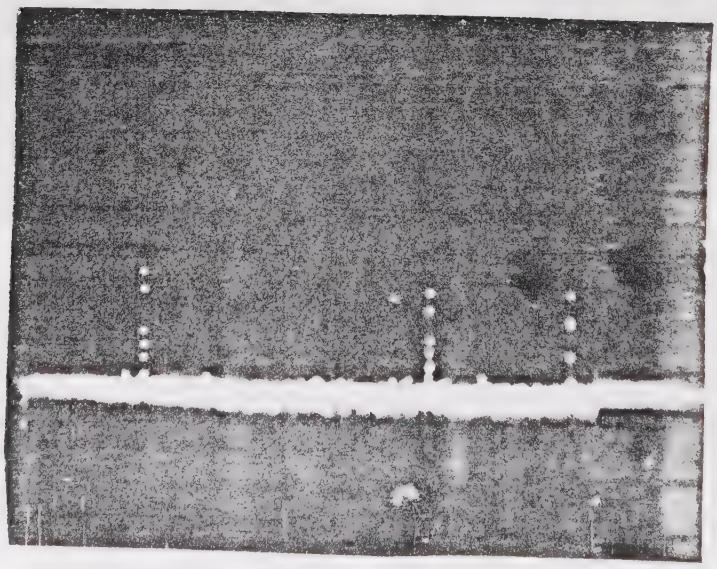


PHOTO 6

La dérivation de cette relation par rapport aux variables y_i nous permet d'évaluer l'erreur Δx commise sur l'abscisse x ; nous obtenons :

$$\Delta x \sim \frac{3}{2} \frac{\Delta y}{y_{max}}$$

où Δy est l'erreur commise sur l'amplitude du signal donné par chaque élément ; l'expérience montre que $\frac{\Delta y}{y_{max}}$ est toujours au moins égale à 10 %, ce qui conduit à une erreur sur la position des raies de l'ordre de 0.15 pas.

La photo 6 représente le signal de la barrette lorsque le spectrographe est illuminé par la lampe spectrale que nous avons choisie pour étalonner l'appareil. Il s'agit d'une lampe à He, qui possède deux raies situées à l'intérieur du domaine spectral étudié (540 - 700 nm) : $\lambda_1 = 5875,62$ $\lambda_2 = 7065,19$. La raie jaune de cette lampe étant plus intense que la raie rouge, situation inverse de la précédente, nous avons été amenés à compliquer sensiblement l'amplificateur à gain variable, celui-ci est double afin de pouvoir être adapté à chaque situation. Signalons que nous avons essayé tout d'abord une lampe à Hg qui possède deux raies mieux situées que celles à He($\lambda_1 = 546$ mm, $\lambda_2 = 691$ mm), mais malheureusement, nous avons constaté que l'intensité de la raie 691 est beaucoup trop faible et sa largeur spectrale est trop grande pour que l'on puisse déterminer sa position avec une bonne précision.

Enfin, notons que compte tenu de la fluctuation de l'amplitude Δy du signal mentionné ci-dessus, il suffit, pour convertir les échantillons en nombres binaires, d'utiliser un convertisseur analogique/numérique à 8 bits. En effet, un tel convertisseur ne présente qu'une erreur absolue de $\frac{1}{255}$, largement petite devant Δy.

B - LE SIGMAMETRE

Le principe de cet élément a déjà été décrit dans l'introduction. En particulier, il est composé d'une partie optique relativement complexe (figure 2) qui nécessite un soin tout particulier dans la réalisation. Il faut signaler par exemple que chacun des prismes qui composent le bloc doit être réalisé à la cale d'angle avec une précision meilleure que 10^{-5} radian.

Nous avons cherché dans ce nouvel appareil à éliminer en grande partie les difficultés de réalisation, afin de faire de l'instrument un prototype éventuellement industrialisable.

1. L'interféromètre ; principe du bloc séparateur de faisceau ; calcul de ses paramètres.

Celui-ci est composé, comme le montre la figure 11, d'un bloc optique compact qui comporte une face séparatrice L_2 et une face A sur laquelle le faisceau vient se réfléchir totalement. C'est sur cette face que se produit le déphasage $\Delta\psi$ entre les composantes du faisceau polarisées respectivement parallèlement et perpendiculairement au plan de la figure. Les deux miroirs M_1 et M_2 de l'interféromètre sont montés sur une même base en Invar ; le miroir M_1 est ajustable, tandis que le miroir M_2 est porté par une céramique piézo-électrique. Mis à part le bloc séparateur, le principe du système est identique à celui décrit dans le chapitre I.

Le bloc séparateur de faisceau est composé de trois lames (A, B et C) à faces parallèles identiques en dimensions. Grâce à cette juxta-

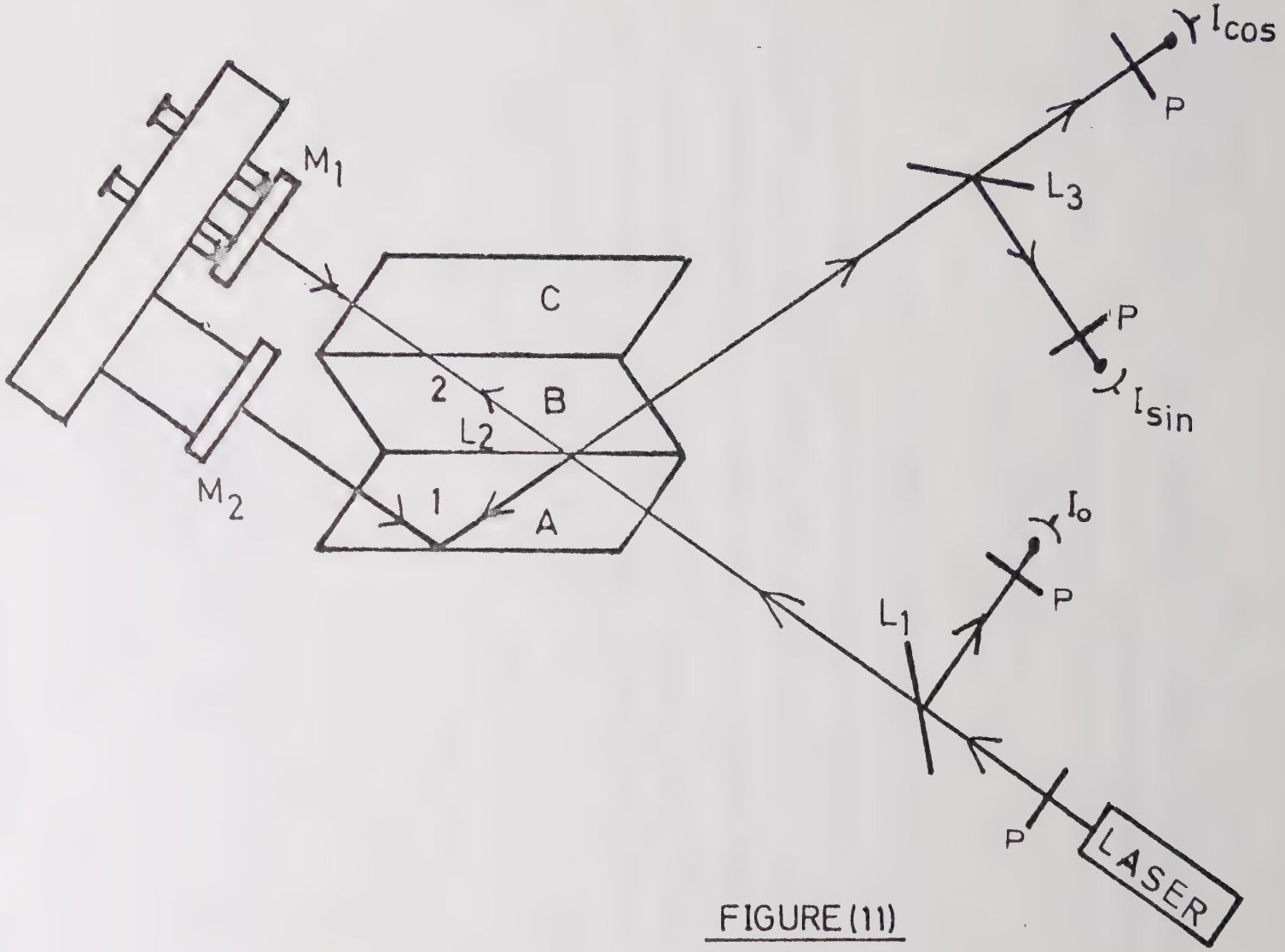


FIGURE (11)

position de ces trois lames et à leur montage sous contrôle interférométrique, dont nous verrons la réalisation par la suite, les deux faisceaux 1 et 2, séparés par la couche L_2, parcourent le même chemin optique dans le verre du bloc rendant ainsi l'appareil achromatique.

L'angle θ des lames A, B et C est fixé par le déphasage $\Delta\psi$ que l'on désire obtenir à la réflexion totale. Il est calculé à l'aide de la formule de Fresnel :

$$\operatorname{tg}\frac{\Delta\psi}{2} = \frac{\cos\theta\sqrt{\sin^2\theta - \frac{1}{n^2}}}{\sin^2\theta} \qquad (1)$$

où n est l'indice de réfraction relative du verre du bloc.

Le verre que nous avons choisi est un verre SOVIREL de la famille BSC (Boro-Silicat Brown) de type B16-14, qualité Astro. Ce verre, en effet, possède des qualités optiques et physiques excellentes (par exemple, il est homogène, peu dispersif et il a une biréfringence négligeable). Son indice n pour $\lambda = 620$ nm (le milieu du domaine spectral (540-700)) est égal à 1.51536; pour cette valeur et pour $\Delta\psi = \frac{\pi}{4}$ la formule (1) nous donne $\theta = 55{,}10^{\circ}$.

Nous pouvons alors calculer les deux déphasages $2\psi_{\parallel}$ et $2\psi_{\perp}$, que les deux polarisations $\parallel$ et $\perp$ subissent lors de leurs deux réflexions totales dans le bloc ; à l'aide des deux formules suivantes :

$$\operatorname{tg}\frac{\psi_{\parallel}}{2} = \frac{n^2\sqrt{\sin^2\theta - \frac{1}{n^2}}}{\cos\theta} \qquad (2)$$

$$\operatorname{tg}\frac{\psi_{\perp}}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2\theta - \frac{1}{n^2}}}{\cos\theta} \qquad (3)$$

ce qui donne pour $\lambda = 620$ nm

$$2\psi_{||} = 251.62^{\circ} = 4.39 \text{ r}$$

$$2\psi_{\perp} = 161.62^{\circ} = 2.83 \text{ r}$$

Ces deux valeurs nous permettent de déterminer l'origine des phases (ou des excédents fractionnaires) mesurées par le sigmamètre. En effet, les deux signaux issus de ce dernier sont proportionnels aux deux quantités :

$$S_{||} = \cos(2\pi\delta\sigma + 2\psi_{||}) \qquad (4)$$

$$S_{\perp} = \cos(2\pi\delta\sigma + 2\psi_{\perp}) \qquad (5)$$

en remplaçant $\psi_{||}$ et $\psi_{\perp}$ par leurs valeurs en radiant et $\delta\sigma$ par l'ordre de l'interférence $N + \varepsilon$, les quantités (4) et (5) deviennent

$$S_{||} = - \sin 2\pi(\varepsilon + \varepsilon_o)$$

$$S_{\perp} = \cos 2\pi(\varepsilon + \varepsilon_o)$$

où l'origine ε_o des excédents fractionnaires mesurés est égale à 0.449.

Nous devons maintenant vérifier que la dispersion du verre n'entraîne que des variations négligeables, d'une part du déphasage $\Delta\psi$ et d'autre part de l'origine ε_o.

Compte tenu des valeurs de l'indice de réfraction n du verre nous trouvons, pour $\lambda_1 = 540$ nm et $\lambda_2 = 700$ nm

$$2\,\Delta\psi_1 = 90{,}32°$$

$$2\,\Delta\psi_2 = 89{,}96°$$

c'est-à-dire une variation 0.36° quand λ varie d'une extrémité à l'autre du domaine spectral considéré, ce qui est négligeable du fait que cette variation n'entraîne qu'une erreur de 0.28° sur la mesure de la phase donnée par le sigmamètre {5} . Cette erreur est beaucoup plus petite que 3.6° l'incertitude que nous estimons avoir sur nos mesures.

L'origine ε_o, calculée elle aussi pour les mêmes valeurs de λ, prend les deux valeurs suivantes :

$$\varepsilon_{o1} = 0.450$$

$$\varepsilon_{o2} = 0.448$$

Elle ne varie donc pas plus de 2 °/$_{oo}$, ce qui est aussi très négligeable.

2. Réalisation et montage des différents éléments du bloc optique : achromatisme.

Le bloc optique de l'interféromètre a été conçu de telle façon que sa réalisation ne présente pas de difficultés particulières. La composition originale de ce bloc en trois lames à faces parallèles identiques permet d'autre part la réalisation de plusieurs ensembles simultanément facilitant ainsi l'industrialisation de l'appareil.

La réalisation des éléments du bloc comporte trois étapes représentées sur la figure 12 :

1°/ réalisation d'une lame à faces planes et parallèles, ce qui peut être aisément effectué avec une précision de $\lambda/20$;

2°) polissage de deux faces opposées formant chacune avec les faces précédentes un dièdre d'angle $\theta = 55,10°$. La précision sur le parallélisme de ces deux faces n'est pas critique ; elles peuvent donc être polies indépendamment ;

3°) découpage du bloc dans les plans perpendiculaires aux faces polies pour former trois éléments en forme de parallélépipèdes identiques.

Avant l'assemblage des divers éléments, l'un d'eux a été traité d'une couche semi-réfléchissante 47 %,47 % de type (DIACHROVEX) conçue pour être placée entre deux lames transparentes.

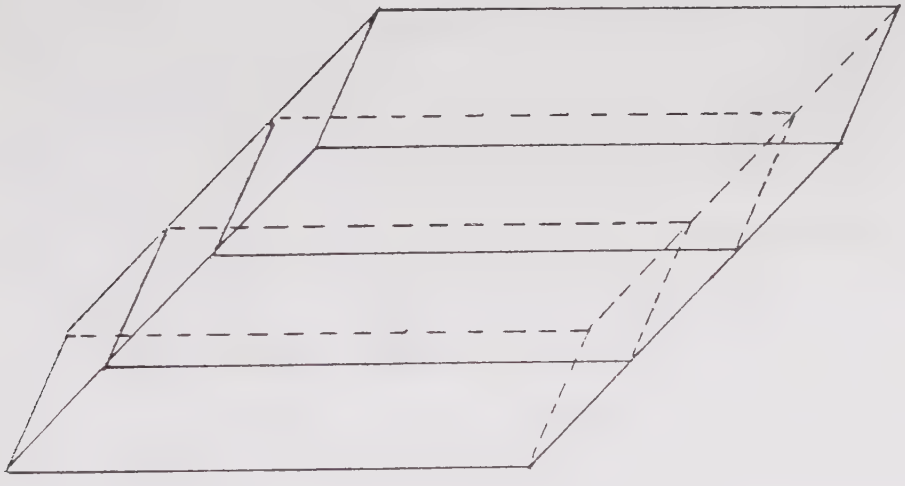


Figure 12

L'assemblage du bloc a été effectué sous contrôle interférométrique. Nous avons d'abord collé par adhérence moléculaire les deux lames entre lesquelles se trouve la couche séparatrice ; ensuite, pour coller la troisième lame, nous avons utilisé le montage présenté sur la figure 13.

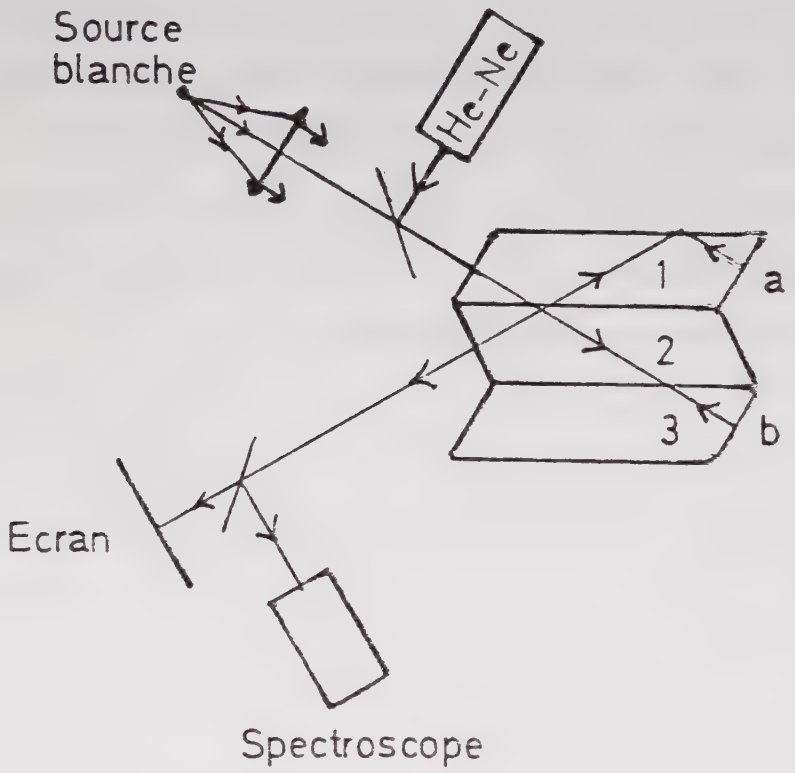


Figure 13

Le but de cette opération est de positionner la lame (3) de telle façon que les chemins optiques dans le verre du bloc pour les deux voies de l'interféromètre soient parfaitement identiques. Sinon, un défaut d'achromatisme, dû à la dispersion du verre, introduira une erreur de phase dépendant de la longueur d'onde.

Pour cela, on utilise le fait que le bloc optique doit alors, lui-même, constituer un interféromètre dont les miroirs sont les faces (a) et (b), que celui-ci doit être parfaitement réglé et de D.D.M. nulle.

La lame (3) est préalablement positionnée en l'appliquant sur la face de la lame (2) par l'intermédiaire d'une fine lame d'eau distillée. Un faisceau laser est envoyé dans l'interféromètre ainsi constitué afin d'ajuster le parallélisme des faces (a) et (b). Simultanément, un faisceau de lumière blanche traverse cet interféromètre, puis est analysé par un spectroscope. On observe alors des cannelures dans le spectre ; il suffira ensuite, tout en conservant l'alignement, de faire glisser la lame (3) par rapport à l'ensemble des deux autres, afin d'augmenter l'intervalle entre deux cannelures consécutives et, finalement, atteindre une D.D.M. voisine de O. L'adhérence moléculaire entre les deux faces se produit alors tout naturellement par l'évaporation de l'eau.

La photo 7 représente l'interféromètre monté sur son support définitif. Nous distinguons le bloc séparateur de faisceau et les deux miroirs, l'un fixé sur une céramique et l'autre réglable.

3. Adaptation des différentes sources lumineuses à l'interféromètre ; alignement.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'interféromètre est traversé par deux faisceaux de lumière de nature complètement différente : un faisceau de lumière blanche issu d'une source étendue et un faisceau de lumière issu d'une source laser. De ce fait, nous avons été amenés à étudier séparément chacun de ces deux faisceaux.

PHOTO 7

α) *Le faisceau de lumière blanche*

L'adaptation de ce faisceau à l'interféromètre consiste à déterminer la valeur optimale de son ouverture, afin de réaliser le meilleur compromis entre résolution et luminosité, c'est-à-dire, dans notre cas, la plus grande amplitude du signal de franges en sortie de l'interféromètre.

Pour cela, il faut calculer le flux lumineux total transmis par un interféromètre de Michelson quand il est éclairé par une source étendue d'ouverture angulaire Ω_o.

Ce flux est donné par {6}

$$\underline{\Phi}(\sigma) = B_o A \left[\frac{\Omega o}{2} + \frac{\sin \sigma \delta_o \frac{\Omega o}{2}}{\sigma \delta_o} \cos 2\pi\sigma\delta_o (1 - \frac{\Omega o}{4\pi}) \right]$$

où B_o est la brillance de la source et $A\Omega_o$ est l'étendue du faisceau.

Pour une ouverture infiniment petite, cette relation se réduit à :

$$\frac{B_o A \Omega_o}{2} (1 + \cos 2\pi\delta\sigma)$$

On observe alors que l'utilisation d'un faisceau d'ouverture finie a deux effets :

1°/ il introduit un déphasage supplémentaire : $\sigma\delta_o \frac{\Omega o}{2}$ dépendant de σ, qui peut être assimilé à une diminution de la D.D.M.δ_o de la quantité $\frac{\delta_o \Omega_o}{4\pi}$.

2°/ il multiplie l'amplitude de la modulation $\cos 2\pi\sigma\delta_o$ par un facteur $\frac{\sin \sigma\delta_o \frac{\Omega o}{2}}{\sigma\delta_o}$. Cela a pour conséquence de réduire le contraste des

franges observées. D'autre part, cette amplitude sera maximum pour $\sigma\delta_o \frac{\Omega_o}{2} = \frac{\pi}{2}$. Dans cette condition, la D.D.M. mesurée à partir des signaux que donne l'interféromètre de la source de lumière blanche diffèrera de δ_o de $\frac{\lambda}{4}$, ce qui est tout juste acceptable pour permettre une prédétermination assez précise de la D.D.M. δ_o. Nous verrons par la suite que l'angle solide pratiquement utilisé est choisi beaucoup plus faible, ce qui fait que nous pourrons considérer cet effet comme négligeable.

β) *Le faisceau de lumière d'un laser*

Le faisceau provenant du laser est un faisceau gaussien qui pourra être considéré comme un faisceau parallèle par l'interféromètre, pourvu que sa divergence soit suffisamment faible. On peut montrer {5} que le vecteur d'onde k de la radiation vue par l'interféromètre diffère de la vraie valeur d'au plus une quantité égale à $\frac{1}{Z_o}$ où Z_o est le paramètre confocal du laser ($Z_o = \frac{\pi\omega_o^2}{\lambda}$ où $Z\omega_o$ = la dimension transversale minimum du faisceau). La précision de notre instrument étant de l'ordre de $0{,}1\ cm^{-1}$, on devra alors avoir :

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2\pi Z_o} < \frac{1}{10}\ cm^{-1}$$

d'où $Z_o > 1{,}6$ cm.

Compte tenu de ce que les paramètres confocaux des lasers courants sont de l'ordre du mètre, ce type d'effet est donc négligeable. D'autre part, l'interféromètre sera éclairé par deux faisceaux laser différents : le faisceau du laser He-Ne de l'étalonnage et le faisceau du laser de mesure. Ceci posera le problème de l'alignement de ces deux faisceaux. En effet, un mauvais alignement fait que ces deux faisceaux

parcourront deux chemins optiques différents dans l'interféromètre ; ce qui fait changer la différence de marche de l'interféromètre. Ce changement se traduira par une erreur sur la mesure de l'excédent fractionnaire.

Afin d'évaluer ce type d'erreur, nous considérons deux lasers dont les faisceaux font un petit angle θ_1 et θ_2 avec l'axe de l'interféromètre. Si δ_o est la D.D.M. sur l'axe, chacun des deux faisceaux verra une D.D.M. respectivement égale à $\delta_o \cos\theta_1$ et $\delta_o \cos\theta_2$; il s'en suivra une erreur associée à la différence des D.D.M. : $\delta_o \left(\frac{\theta_1^2}{2} - \frac{\theta_2^2}{2}\right)$. Si chacun des faisceaux est défini à θ près, cette erreur sera au maximum égale à $\delta_o \frac{\theta^2}{2}$. Afin de conserver la précision de mesure à $\frac{0.01}{\delta}$ nous devons avoir :

$$\delta_o \frac{\theta^2}{2} < \frac{\lambda}{100}$$

soir pour $\delta_o = 1$ mm $\qquad \lambda = 0.54\ \mu$

$$\theta < 3\ 10^{-3}$$

Il suffit, pour réaliser cette condition, de faire passer les différents faisceaux lasers par deux trous de diamètre 1,5 mm et séparés d'une distance de 60 cm. En effet, dans ces conditions, l'angle entre les faisceaux qui passent par ces deux trous est inférieur à $\frac{1.5}{600}$ soit $2.5\ 10^{-3}$ r.

4. Système électronique de détection des signaux optiques donnés par l'interféromètre

Ce système est constitué de trois photodiodes (type UDT 450) qui convertissent les signaux optiques donnés par l'interféromètre en signaux électriques (voir figure 14) ; ces trois détecteurs sont suivis de trois échantillonneurs bloqueurs qui permettent de traiter les signaux obtenus

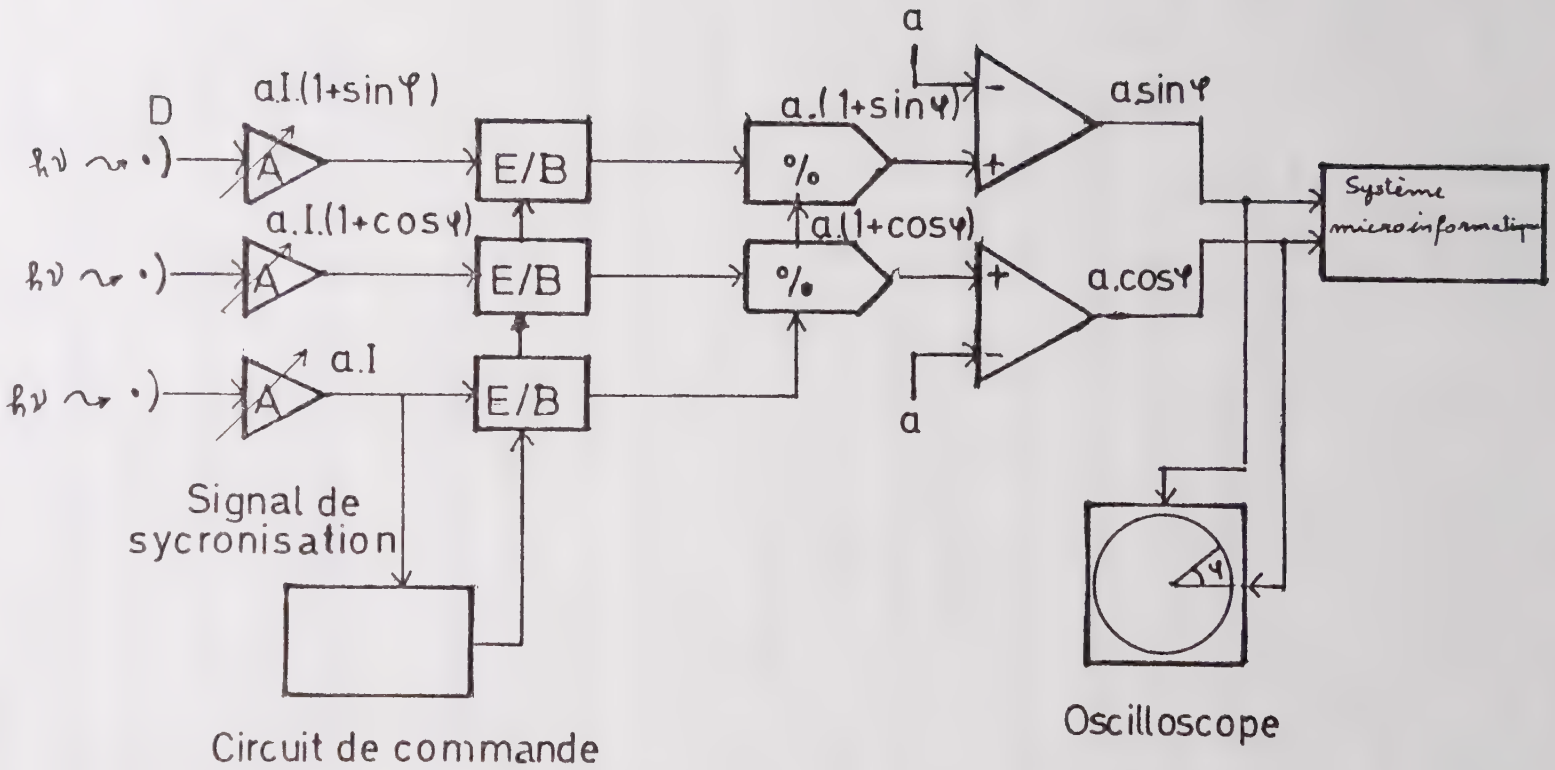

D
a.I.(1+sinφ)
a.I.(1+cosφ)
a.I
E/B
E/B
E/B
A
A
A
a
a.(1+sinφ)
a.(1+cosφ)
%
%
a.sinφ
a.cosφ
Système micro-informatique
Signal de sycronisation
Circuit de commande
Oscilloscope

FIGURE (14)

lorsque la source laser, dont on désire mesurer la fréquence, fonctionne en impulsion. Ces trois composants sont commandés par un ensemble électronique qui permet, suivant le type du laser considéré, soit d'échantillonner et bloquer les impulsions, soit laisser passer les signaux continus.

Les signaux sont ensuite traités analogiquement : 1°/ par deux diviseurs pour éliminer les fluctuations de l'intensité du laser, 2°/ par deux amplificateurs différentiels qui permettent d'éliminer la composante constante moyenne des deux signaux.

Nous obtenons alors en sortie de ce système deux signaux proportionnels aux deux quantités $\sin\phi$ et $\cos\phi$. Le réglage de ce système s'effectue à l'aide d'un oscilloscope ; sur son écran, nous pouvons visualiser un cercle en appliquant un signal de dents de scie sur la céramique portant un des miroirs de l'interféromètre. La photo 8 montre ce cercle, obtenu à l'aide d'une source laser continue. La photo 9 montre simultanément le signal d'impulsion obtenu en sortie d'un détecteur ainsi que le résultat de son traitement par les échantillonneurs/bloqueurs, cela lorsque le laser fonctionne en impulsion. La photo 10 représente le cercle obtenu avec un tel laser ; les fluctuations de puissance du laser d'une impulsion à l'autre étant de l'ordre de 10 à 20 %, on peut remarquer que notre système de compensation fonctionne relativement bien.

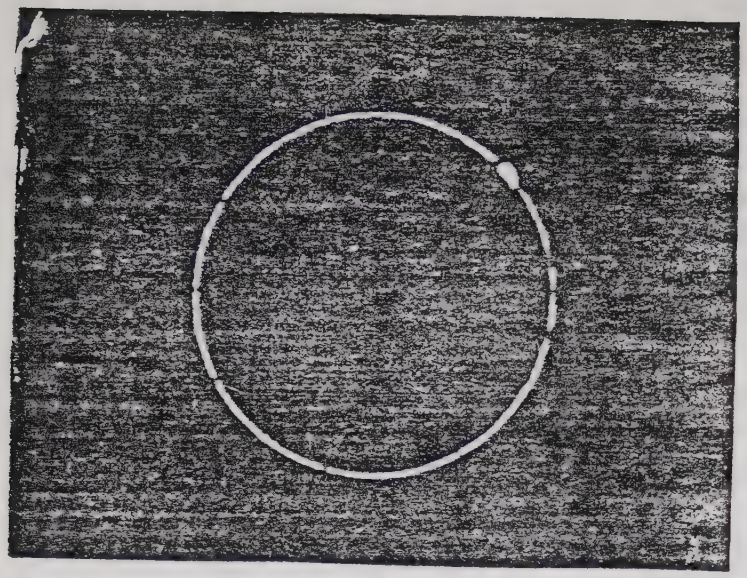


PHOTO 8

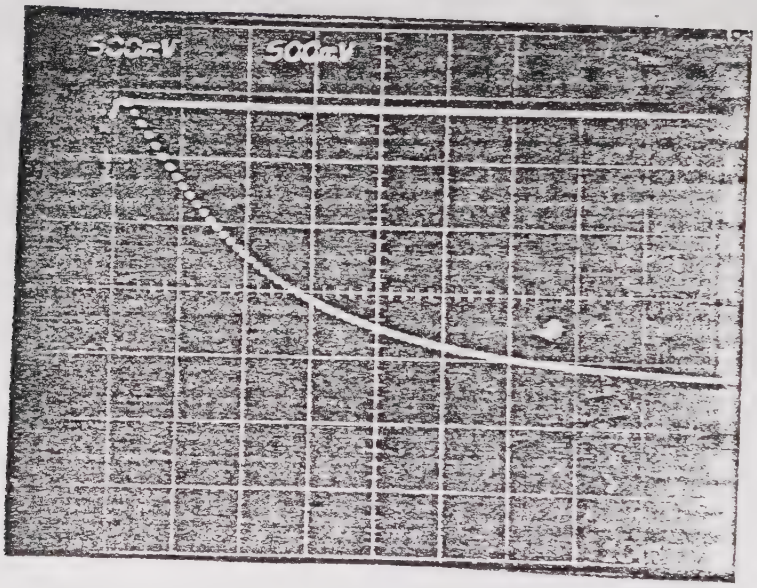


PHOTO 9

PHOTO 10

C - PRESENTATION DE L'ENSEMBLE OPTIQUE DE L'APPAREIL : COUPLAGE ENTRE LES DIFFERENTS ELEMENTS

Le schéma de la figure 15 représente l'organisation des différents éléments constituant la partie optique de l'appareil. Ces éléments sont fixés sur un marbre de dimension 70 x 40 x 4 cm. La hauteur de cet ensemble est de 13 cm.

La lame séparatrice S_1 (transmission ou T = 50 %) permet d'envoyer dans le système les deux faisceaux lumineux provenant d'une part du laser He-NE, fixé sur le marbre et, d'autre part d'un laser extérieur dont on veut mesurer le nombre d'ondes. A partir de S_1 chacun de ces deux faisceaux suit le même trajet optique, fixé par deux trous identiques T_1 et T_2 de diamètre égal à 1,5 mm placés à une distance de 60 cm, grandissant ainsi leur alignement à mieux que $2.5\ 10^{-3}$; la polarisation de ces faisceaux est définie par un polariseur P_4 , et une fraction de leur intensité est envoyée sur le détecteur D_1, de référence, par l'intermédiaire d'une lame non traitée S_2.

La lame séparatrice S_3 (T = 80 %) envoie les faisceaux des lasers dans l'interféromètre ; en sortie, le faisceau transmis est envoyé sur deux détecteurs D_2 et D_3 à l'aide des lames S_5 (T = 80 %) et S_6 (T = 50 %); chacun de ces détecteurs analyse une polarisation bien définie du faisceau à l'aide des polariseurs P_2 et P_3. La partie réfléchie de l'interféromètre est focalisée sur la fente F du spectrographe à l'aide de la lame S_3 et la lentille L_2.

L'adaptation du faisceau lumineux provenant de la source blanche est réalisée par l'intermédiaire de la lentille L_1. Ce faisceau

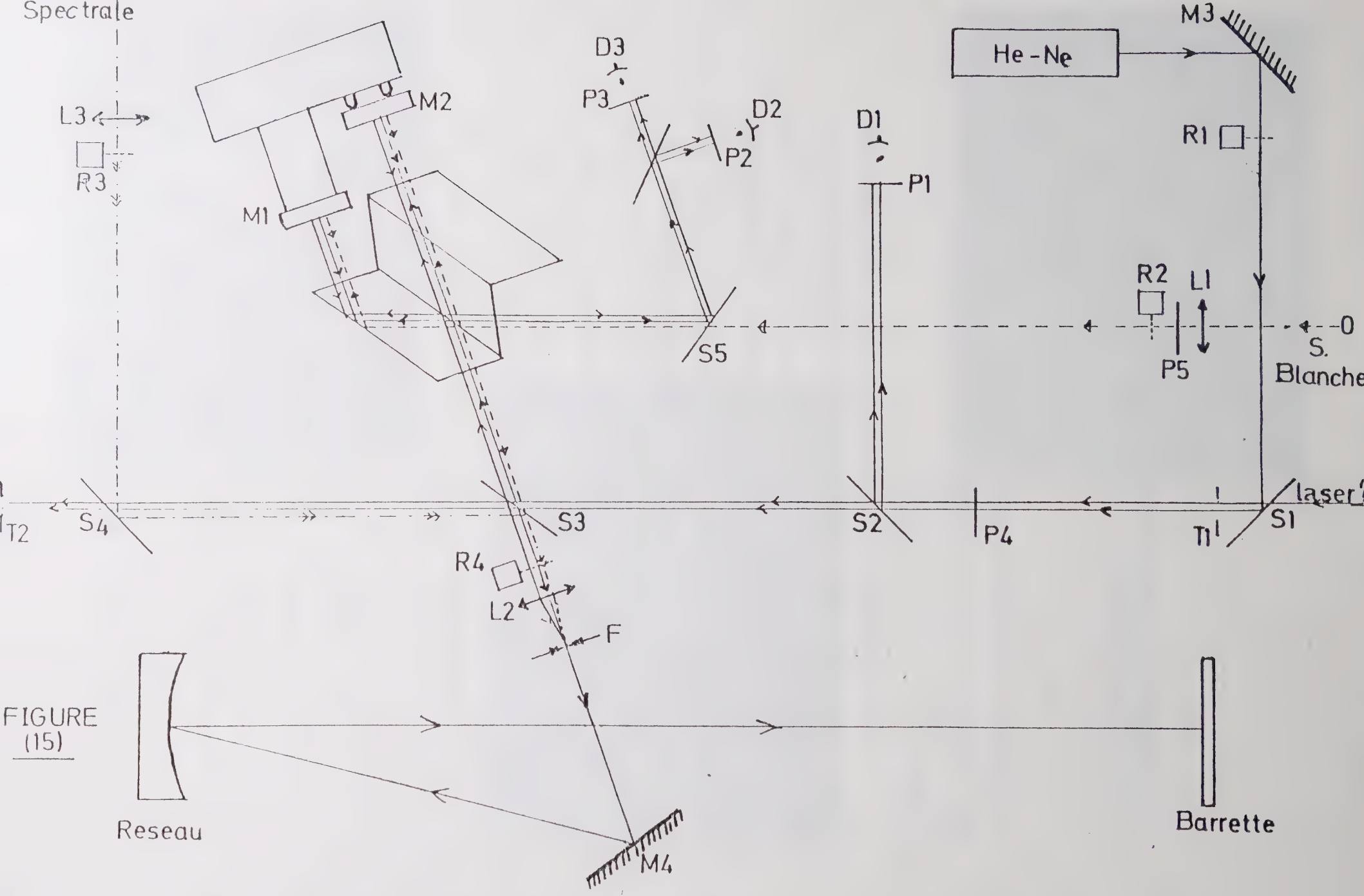

Spectrale
L3
R3
M1
M2
D3
P3
D2
P2
D1
P1
M3
He - Ne
R1
R2
L1
P5
S5
S.
Blanche
S4
S3
S2
P4
T1
S1
laser
T2
R4
L2
F
Reseau
M4
Barrette

FIGURE (15)

suit l'inverse du trajet optique suivi par les faisceaux des lasers ; il traverse l'interféromètre pour être ensuite focalisé, comme les faisceaux des lasers, par la lentille L_2 sur la fente F du spectrographe.

Enfin, le faisceau lumineux de la lampe spectrale est collimaté par la lentille L_3; il se réfléchit successivement sur les deux lames S_4 (T = 20 %) et S_3, et il est focalisé ensuite sur la fente F comme tous les autres faisceaux.

Les valeurs des distances focales des lentilles L_1, L_2 et L_3 (f_1, f_2 et f_3), ainsi que la surface de la section du faisceau de lumière blanche, sont déterminées en tenant compte des paramètres du système déjà fixés : il s'agit de l'étendue géométrique de l'optique du spectrographe et de l'angle solide Ω du faisceau admissible par l'interféromètre. Nous savons que, d'une part, l'étendue linéaire du spectrographe est, dans sa plus grande dimension, de l'ordre de

$$\frac{0.3 \times 50}{308} = 4{,}8\ 10^{-2}\ \text{mm}$$

et que, d'autre part, l'angle solide Ω de la source vue par l'interféromètre doit être inférieure à $\pi\frac{\lambda}{\delta o}$ (paragraphe B.3) = $1{,}7\ 10^{-3}$ (λ = 0.54 μ, δ_o = 1 mm). On en conclut que le diamètre D du faisceau de lumière blanche au niveau de la lentille L_1 doit être tel que

$$D \times \sqrt{1.7\ 10^{-3}} > 4.8\ 10^{-2}$$

c'est-à-dire $D > 1.16$ mm

Pour des raisons de commodité, nous avons fixé la distance focale de L_2 à 2 cm. Nous pouvons alors montrer que pour couvrir tout le

réseau du spectrographe, le diaphragme placé sur L_2 doit être ≥ 3.25 mm. Finalement, le rapport $\frac{d}{f_1}$ entre la plus grande dimension de la source de lumière blanche et la focale de la lentille L_1 doit être tel que l'image de la source couvre la hauteur utile de la fente d'entrée du spectrographe, c'est-à-dire 0.3 mm

$$\frac{d}{f_1} = \frac{0.3}{f_2}$$

En choisissant une source (halogène) de dimension 1.7 x 1.3 mm, nous obtenons :

$$f_1 = 11 \text{ cm.}$$

La valeur de la distance focale de la lentille L_3 n'est pas critique, compte tenu de l'étendue que présente la lampe spectrale (nous avons utilisé une lentille de distance focale à 10 cm).

L'ensemble comporte également quatre relais, commandés par le système micro-informatique de l'appareil ; trois d'entre eux (R_1, R_2 et R_3) permettent d'introduire dans l'appareil respectivement soit le faisceau du laser He-Ne, soit celui de la lampe de lumière blanche, soit celui de la lampe spectrale. Le relais R_4 , placé à l'entrée du spectrographe, porte un atténuateur qui n'entre en action que pour les faisceaux lasers, afin de ne pas saturer les photodiodes de la barrette.

La photo 11 représente tout l'ensemble optique de l'appareil. Les éléments principaux de cet ensemble sont numérotés. Nous trouvons successivement :

1. la barrette de photodiodes,
2. le réseau holographique concave à champ plan,
3. la fente d'entrée du spectrographe,
4. l'interféromètre,
5. les trois détecteurs des faisceaux du sigmamètre,
6. la lampe spectrale à He,
7. le tube du laser He-Ne,
8. la position de la source de la lumière blanche.

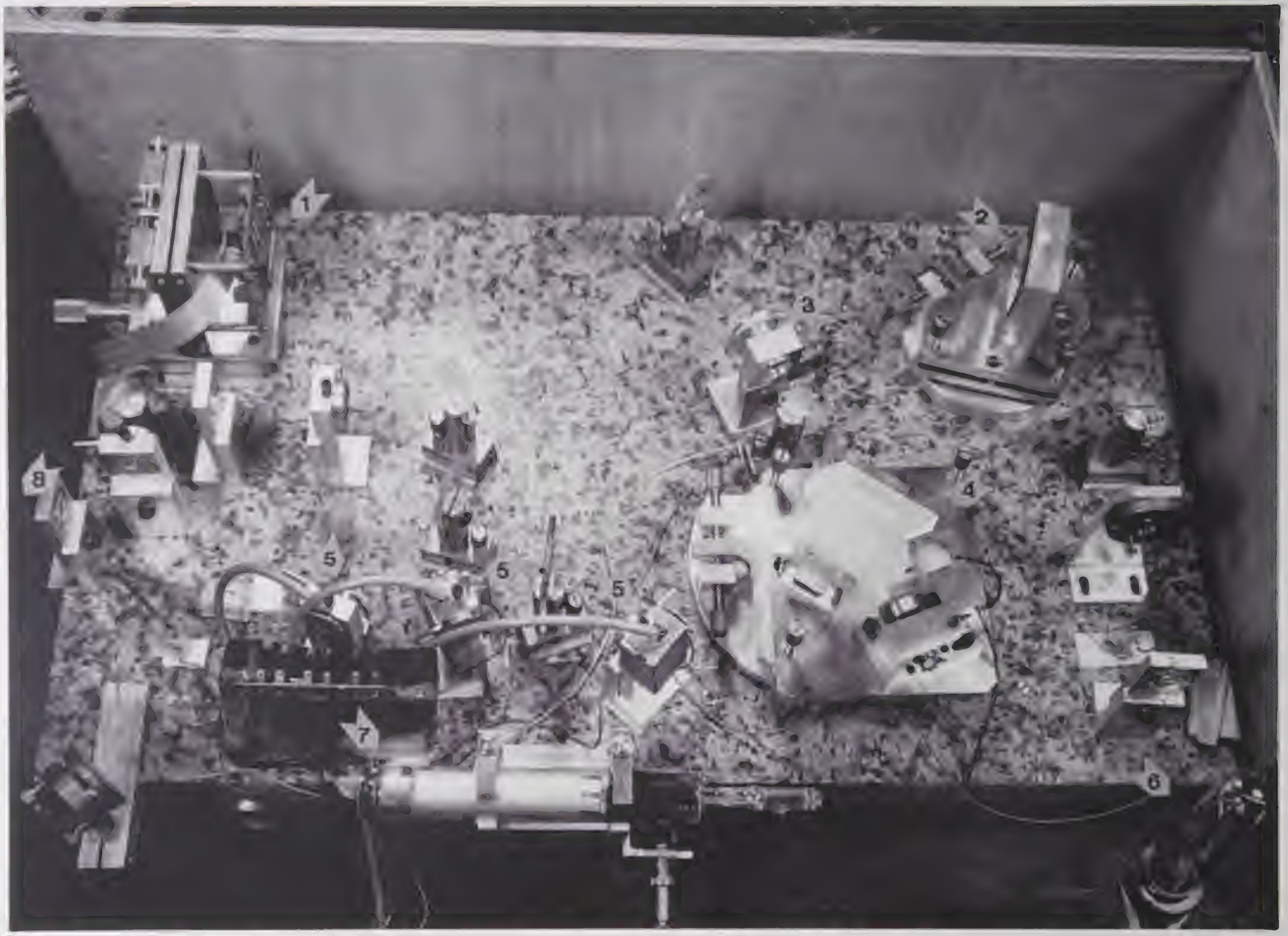


PHOTO 11

CHAPITRE V

DESCRIPTION DU SYSTEME MICRO-INFORMATIQUE DE L'APPAREIL

V - DESCRIPTION DU SYSTEME MICRO-INFORMATIQUE DE L'APPAREIL

On appelle système micro-informatique tout système informatique construit autour d'un microprocesseur.

Ce type de système, d'encombrement réduit, peut effectuer des tâches très variées comme, par exemple : l'acquisition et le traitement numérique de données, la régulation de grandeurs physiques et le contrôle de processus. Cette diversité est utilisée dans un large champ d'applications (par exemple : instrumentation, télécommunications et automobiles).

Dans ce chapitre, nous allons décrire notre système qui, comme tout système informatique, se compose de deux parties distinctes appelées conventionnellement le matériel et le logiciel. Le matériel est constitué de tout ce qui est solide dans le système (circuits intégrés et unités périphériques) ; tandis que le logiciel est constitué de deux sortes de programmes :

Premièrement, les programmes d'utilisation qui sont, soit des programmes de commande et de contrôle des tâches à exécuter, soit des programmes de traitement numérique. Un programme principal commande le

déroulement des mesures et des calculs et fait appel à des sous-programmes qui exécutent des tâches répétitives.

Deuxièmement, un programme de test, dit moniteur, qui sert à vérifier le bon fonctionnement des autres programmes et leur exécution.

Nous commencerons par la présentation des différentes tâches que le microprocesseur aura à effectuer pour notre application particulière. Ensuite, dans un deuxième paragraphe, nous décrirons le matériel du système ainsi que les sous-programmes qui commandent le fonctionnement de certains composants. Enfin, nous présenterons le programme principal et les sous-programmes du traitement numérique.

A - LES FONCTIONS DU MICROPROCESSEUR DANS L'APPAREIL

Ces fonctions sont de trois types :

1. le pilotage du fonctionnement de l'appareil,
2. la commande d'un système d'acquisition de données,
3. le traitement numérique de ces données.

1. Le pilotage du fonctionnement de l'appareil

Le fonctionnement de l'appareil doit se faire, comme nous l'avons vu au chapitre II, en deux étapes : on effectue d'abord l'étalonnage pour, ensuite, mesurer le nombre d'ondes du laser inconnu.

Pendant la première étape, le microprocesseur met en mémoire successivement le spectre de la lampe spectrale, le spectre cannelé et les valeurs de deux signaux $\sin(2\pi\varepsilon)$ et $\cos(2\pi\varepsilon)$. Afin de permettre à l'utilisateur d'effectuer des réglages éventuels, entre chaque acquisition, le microprocesseur doit interrompre le programme, fournir un

message à l'utilisateur et attendre un ordre de celui-ci pour poursuivre ensuite le programme.

Pendant la deuxième étape, le micro processeur doit d'une part afficher en permanence la valeur du nombre d'ondes qu'il a calculé, et d'autre part il doit permettre à l'utilisateur d'arrêter l'exécution du programme et de le reprendre ensuite sur son ordre. Ceci, chaque fois que l'utilisateur veut intervenir pour une raison quelconque, par exemple quand il veut changer le laser.

Le microprocesseur doit commander, de plus, quatre relais, dont trois permettent de couper ou faire passer les différents faisceaux introduits dans l'appareil et, le quatrième, d'atténuer l'intensité du faisceau laser qui entre dans le spectrographe.

2. La commande du système d'acquisition de données

Le système d'acquisition de données de l'appareil est constitué par trois chaînes de composants dont chacune permet la détection et la mise en mémoire d'un signal bien déterminé : les deux signaux $\sin(2\pi\varepsilon)$ et $\cos(2\pi\varepsilon)$ du sigmamètre et le signal de la barrette du spectrographe.

Sur la figure 16, nous avons présenté un schéma de principe d'une telle chaîne d'acquisition.

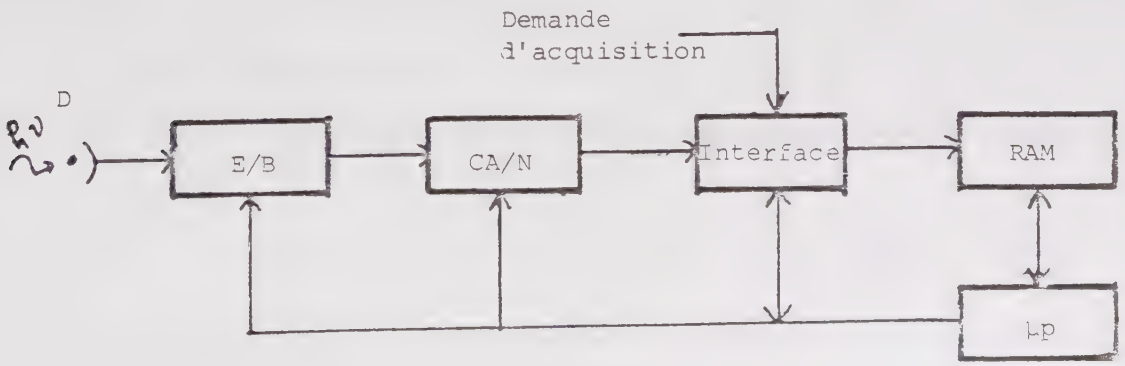


Figure 16

Schéma de principe d'une chaîne d'acquisition de données.

D = Détecteur
E/B = Echantillonneur/Bloqueur
CA/N = Convertisseur Analogique/Numérique
RAM = Mémoire servant au stockage des données
µp = microprocesseur.

Après avoir reçu une demande d'acquisition, transmise par l'interface, le microprocesseur envoie des signaux à des instants précis pour commander le fonctionnement des deux composants : l'E/B et le CA/N, ainsi que pour mettre en mémoire les données acquises.

3. Le traitement numérique des données

Il s'agit pour le microprocesseur de traiter numériquement les données saisies par le système. Ce traitement, dans notre cas, remplit des fonctions très différentes :

. détermination des adresses des maximums du spectre cannelé, des raies de références et de la raie du laser de nombre d'ondes inconnu ;

. comptage du nombre de maximum entre deux raies données (soit les deux raies de références, soit une raie de références et la raie d'un laser) ;

. calcul de la différence de marche de l'interféromètre et du nombre d'ondes du rayonnement laser.

Sur la figure 17, nous avons présenté un organigramme général des différents calculs, en montrant les relations entre eux.

B - LE MATERIEL DU SYSTEME

Les constituants du matériel de notre système micro-informatique sont :

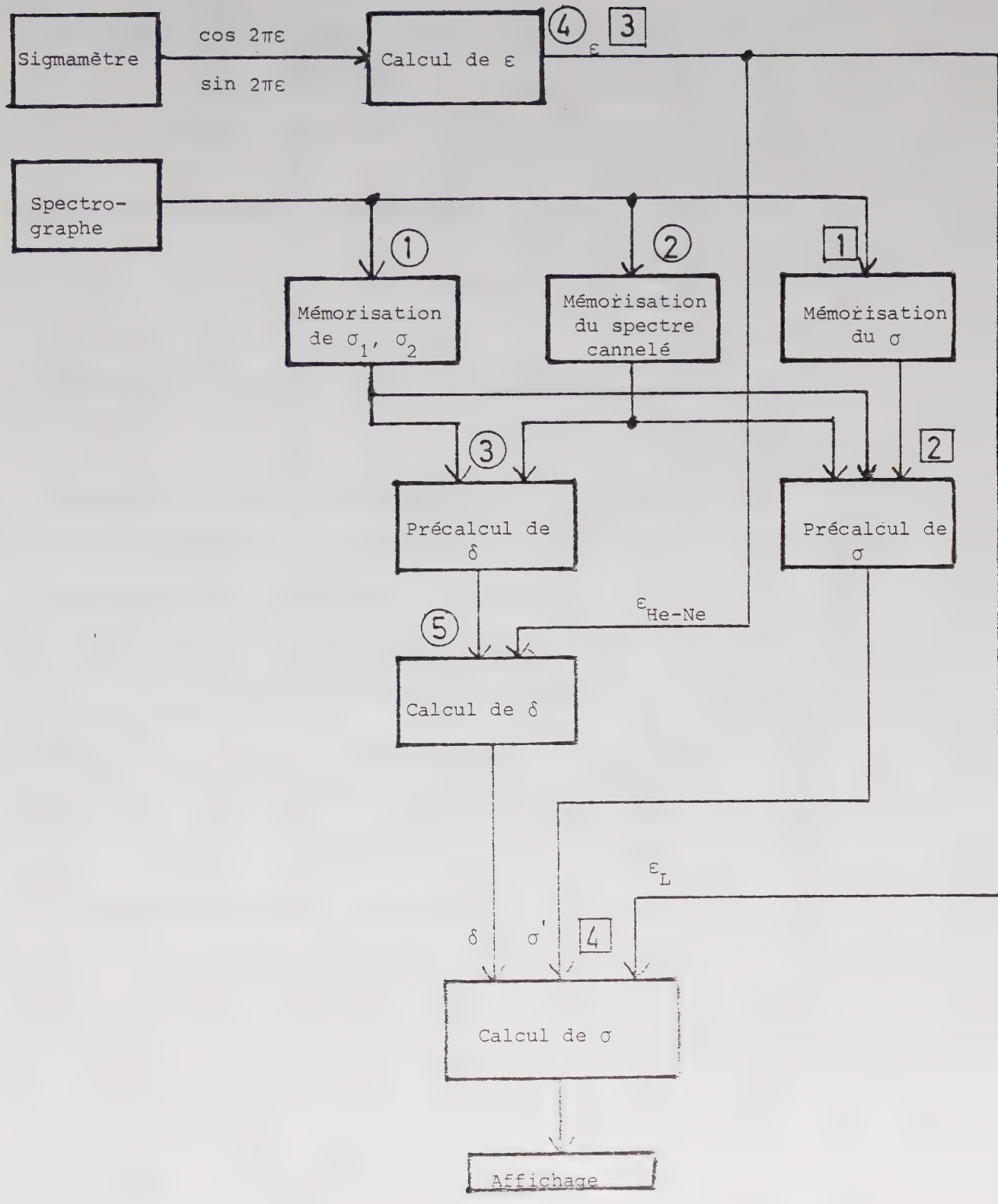

Sigmamètre
cos 2πε
sin 2πε
Calcul de ε
4
ε
3
Spectro-
graphe
1
2
1
Mémorisation
de σ1, σ2
Mémorisation
du spectre
cannelé
Mémorisation
du σ
3
2
Précalcul de
δ
Précalcul de
σ
εHe-Ne
5
Calcul de δ
εL
δ
σ'
4
Calcul de σ
Affichage

Figure 17

1. Une unité centrale : le microprocesseur et les mémoires,
2. Un interface parallèle d'entrée/sortie,
3. Des unités périphériques d'acquisition de données.

Sur la figure 18, nous avons représenté le schéma de principe de l'architecture de ce matériel.

1. L'unité centrale

L'unité centrale est composée du microprocesseur et des mémoires.

α) *Le microprocesseur*

Nous avons choisi le 6809 de Motorola qui présente de nombreux avantages par rapport aux microprocesseurs (µp) de sa catégorie (µp à 8 bits) ; sur ce µp notamment, la multiplication est câblée, les autres opérations arithmétiques peuvent s'effectuer sur des nombres de 16 bits, et son architecture interne comprend de nombreux registres.

Le microprocesseur est relié aux autres constituants du système par plusieurs lignes d'entrée ou de sortie. Ces lignes peuvent se regrouper en quatre groupe distincts :

1°/ Le bus de données : c'est un ensemble de 8 lignes bidirectionnelles permettant la transmission des données au sens large, c'est-à-dire soit les données numériques, soit les codes d'instructions du microprocesseur ;

2°/ Le bus d'adresses : il est composé de 16 lignes unidirectionnelles, ce qui permet au microprocesseur d'adresser 2^{16} mémoires ;

3°/ Le bus de contrôle : il est constitué de 5 lignes destinées à transmettre les commandes des opérations d'entrée/sortie. Nous en avons utilisé 4 : la ligne R/W qui transporte les ordres de lecture ou d'écri-

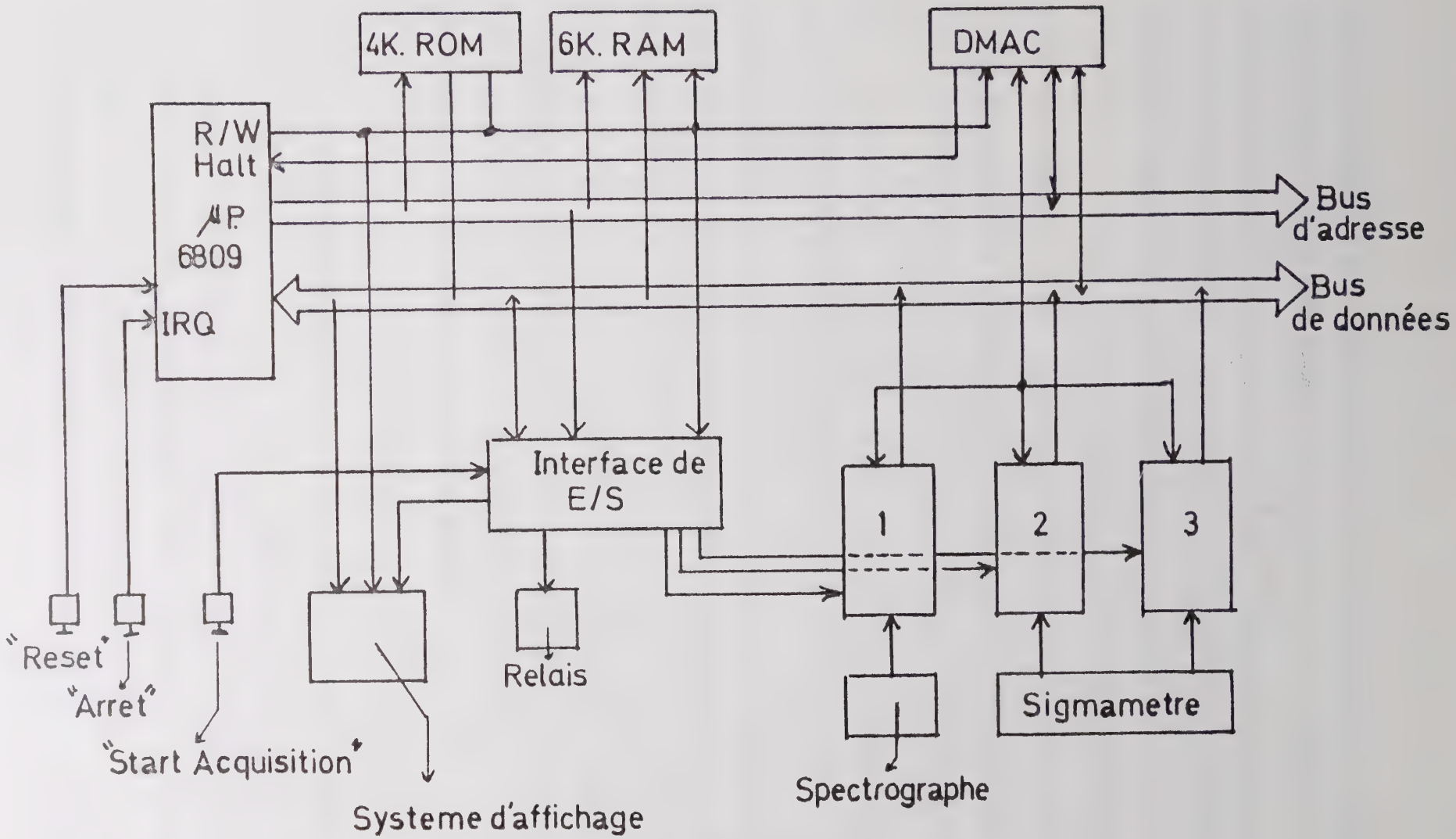

4K. ROM
6K. RAM
DMAC
R/W
Halt
µP
6809
IRQ
Bus
d'adresse
Bus
de données
Interface de
E/S
1
2
3
"Reset"
"Arret"
"Start Acquisition"
Relais
Sigmametre
Spectrographe
Systeme d'affichage

FIGURE (18)

ture dans les mémoires, la ligne HALT qui permet aux unités périphériques d'envoyer au microprocesseur une demande pour avoir un accès direct aux mémoires, et les deux lignes désignées par (BA, BS) dont la combinaison permet au microprocesseur d'envoyer aux unités périphériques un signal appelé "autorisation de DMA". Ces deux derniers signaux seront décrits ultérieurement ;

4°/ Quatre lignes de commande d'interruption ; nous en avons utilisé deux : la commande"RESET" d'initialisation et la commande d'interruption IRQ (Interrup Request).

β) *Les mémoires*

Dans notre système, nous avons utilisé deux types de mémoires :

1°/ Des mémoires dites mortes ou ROM (Read Only Memory), dont le contenu n'est pas effacé par une coupure de courant ; elles contiennent le logiciel résident. Le volume total de ces mémoires est de 4 K octets (1 K octet $\equiv 2^{10}$ x 8 bits) dont 2 pour le moniteur.

2°/ Des mémoires dites vives ou RAM (Random Access Memory) qui sont temporaires. Leur capacité est de 6 K octets ; elles ont été utilisées pour la mise au point des programmes et servent à stocker les résultats intermédiaires du calcul et les acquisitions numériques des signaux.

2. L'interface d'entrée/sortie, son utilisation dans le pilotage du fonctionnement de l'appareil

Cet élément du système est destiné à transmettre les commandes provenant du microprocesseur et à les adapter aux unités périphériques. Dans notre système, cet élément est le circuit Motorola 6821 appelé PIA (Peripheral Interface Adapter). Le PIA comprend une partie A et une

partie B identiques entre elles, mais dont les adresses sont différentes. La sortie vers la périphérie de ce circuit se fait à travers 16 lignes bidirectionnelles groupées en deux ensembles indépendants appelés le port A (PA) et le port B (PB). Le circuit possède également quatre lignes de commande, deux pour chaque port, désignées par CA1, CA2, CB1 et CB2, qui permettent au microprocesseur de communiquer avec les unités périphériques.

L'organisation interne du PIA est représentée par la figure 19. Les parties A et B possèdent chacune trois registres de 8 bits.

1°/ un registre de contrôle (CRA ou CRB), dont la valeur de chaque bit détermine une fonction spécifique du PIA ;

2°/ un registre de direction de transfert (DDRA ou DDRB), dont chaque bit sert à fixer le sens de l'échange dans une ligne d'entrée/sortie du port concerné ;

3°/ un registre de données (ORA ou ORB) : ce registre sert de tampon pour l'échange des données entre le microprocesseur et les unités périphériques, Cet échange d'informations se fait de façon simultanée sur les 8 bits de ce registre ; le PIA est de ce fait un interface d'entrée/sortie parallèle.

Les deux registres (DDRA, ORA ou DDRB, ORB) ont la même adresse ; on les distingue par la valeur du deuxième bit du registre de contrôle correspondant.

Ce circuit a été utilisé pour commander toutes les unités périphériques du système. Nous décrivons dans le paragraphe suivant son utilisation dans trois cas particuliers ; son utilisation, dans la commande des unités périphériques d'acquisitions de données, sera décrite ultérieurement.

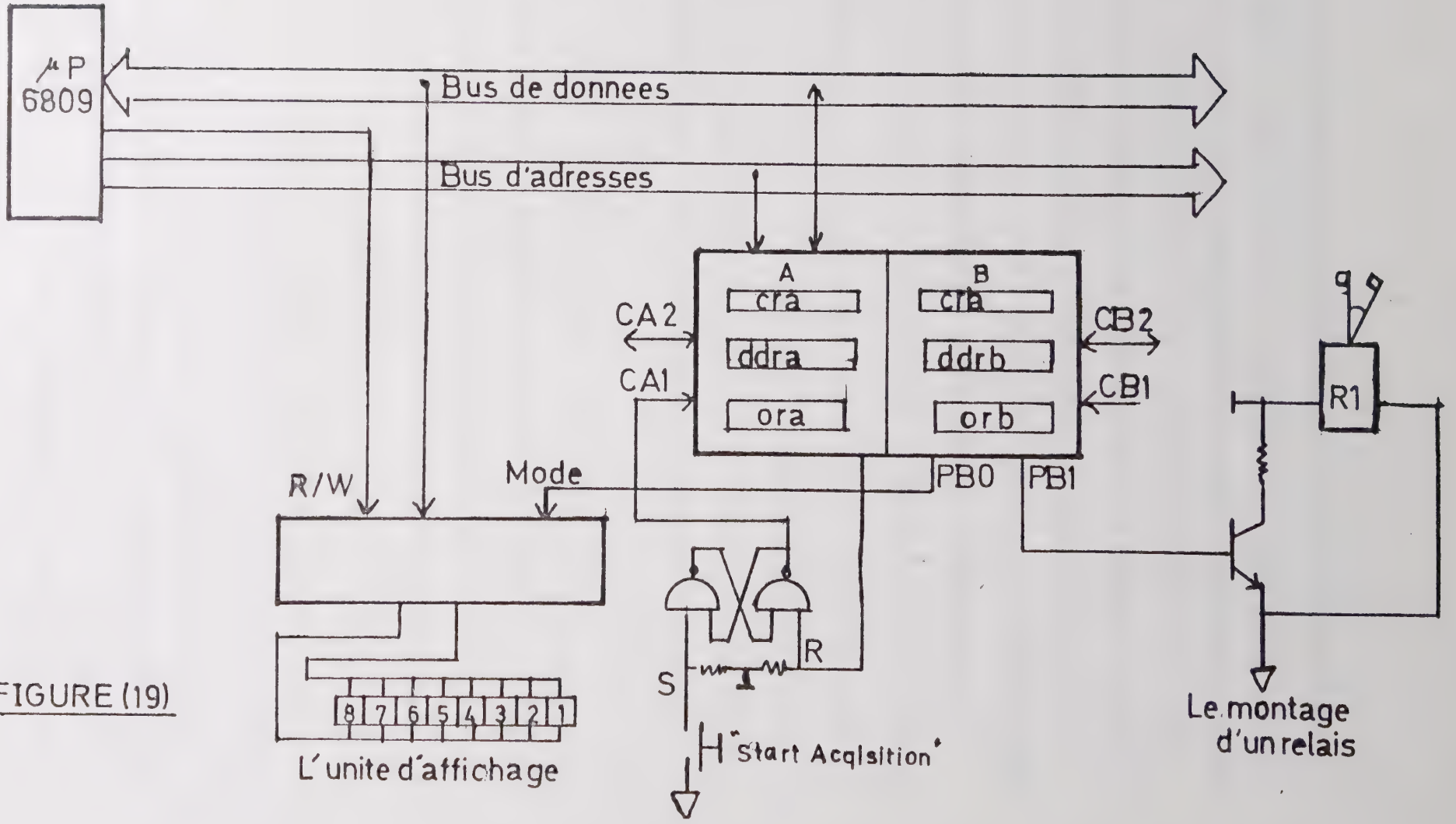

µP
6809
Bus de donnees
Bus d'adresses
A
B
cra
crb
ddra
ddrb
ora
orb
CA2
CA1
CB2
CB1
PB0
PB1
R/W
Mode
R
S
R1
8 7 6 5 4 3 2 1
L'unite d'affichage
"Start Acqisition"
Le montage
d'un relais

FIGURE (19)

α) *La commande des relais*

Cette commande est réalisée très facilement à l'aide des quatre sorties du port B. Le schéma électronique de commande de l'un de ces quatre relais se trouve sur la figure 19. Quand le microprocesseur met à l'état 1 la sortie PB1 du port B, le relais 1 se ferme pour couper le passage du faisceau lumineux.

Pour effectuer cette commande, il suffit en effet d'écrire au bon moment dans le registre ORB une valeur bien déterminée, de telle façon qu'elle ne change que la valeur du deuxième bit d'ORB (bit correspondant à la sortie PB1).

β) *Le dialogue entre le système et l'utilisateur ; la commande "start-acquisition" et l'unité d'affichage*

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe A de ce chapitre, le système doit pouvoir dialoguer avec l'utilisateur lors des changements de sources lumineuses, par exemple ; le système fonctionne alors en mode conversationnel. Ce dialogue consiste à afficher d'abord un message pour rappeler à l'utilisateur le type de source à utiliser, ensuite le système attend que l'utilisateur lui réponde en envoyant la commande de début du processus d'acquisition de données ; c'est la commande "start acquisition".

L'unité d'affichage est constituée de deux composants : une barrette de huit afficheurs et un circuit intégré spécialisé pour contrôler les opérations d'affichage. Ce circuit qui peut recevoir les données en série, venant directement du bus de données, nous a permis de simplifier sensiblement le montage électronique de cette unité. Sur la figure 19 se trouve un schéma de principe de ce montage. En entrée, le circuit de contrôle d'affichage n'a besoin que de deux signaux de commande : le

signal R/W du microprocesseur et un signal de commande appelé "Mode" qui est émis par la sortie PB0 du PIA. Ces deux signaux commandent la lecture, par le circuit d'affichage, successivement : d'un mot de contrôle de 4 bits, et de 8 octets correspondant chacun à l'allumage d'un afficheur ; celui-ci est composé de 7 segments et d'un point décimal. Le mot de contrôle de 4 bits détermine le type de décodage que le circuit doit utiliser pour déchiffrer les données du message. Ces données, en effet, peuvent se présenter sous trois formes différentes que nous décrivons ci-dessous.

L'opération d'affichage s'effectue de la manière suivante : le microprocesseur, à l'aide d'un sous-programme, envoie une impulsion positive sur l'entrée "Mode" du circuit ; pendant la durée de cette impulsion, le microprocesseur émet sur le bus de données les 4 bits du mot de contrôle ; puis, à la fin de cette impulsion, il envoie successivement les 8 octets correspondant au message à afficher (figure 20)

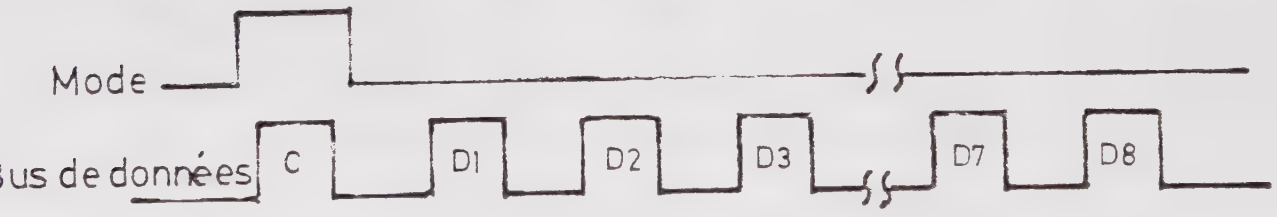


Figure 20

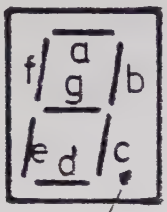
Le diagramme de temps des signaux de commande du contrôleur d'affichage

C ≡ mot de contrôle

D_1 ≡ un octet.

Suivant la valeur du mot de contrôle, les octets qui le suivent peuvent avoir les trois significations suivantes :

1°/ Les huit bits des octets correspondent aux différents sigments et au point décimal d'un afficheur. Cette correspondance est montrée sur la figure 21 ; elle permet la visualisation de plusieurs lettres ou signes différents. Pour cela, nous avons utilisé ce type de codage pour



bits d'une donnée	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
sigments correspondan	p.d.	a	b	c	e	g	f	d

Figure 21

afficher les messages qui correspondent aux changements de sources lumineuses. Ces messages sont :

"SPECTRE , S. BLANCHE, HE-NE, et LASER".

2°/ Seuls 5 bits de chaque mot sont décodés par le circuit ; il affiche en hexadécimales la valeur des quatre premiers bits et il allume le point décimal suivant la valeur du 8ème bit. Nous remarquons que ce type de décodage est bien adapté pour afficher des nombres décimaux. Nous l'avons donc utilisé pour visualiser les valeurs numériques des nombres d'ondes calculés par l'appareil.

3°/ Nous ne présentons cette dernière forme que pour mémoire, car cette forme est identique à la précédente, mis à part que les lettres (A, B, C, D, E et F) du code hexadécimal sont remplacées respectivement par (-, E, H, L, P et blanc).

L'organigramme du sous-programme d'affichage, que nous avons mis au point, est représenté sur la figure 22. Ce sous-programme possède deux entrées différentes suivant le type du message à afficher : message numérique ou message alphabétique.

- Affichage de message numérique :

Un nombre réel N est représenté en virgule flottante sous la forme suivante :

$$N = M\ 10^{E}$$

où la mantisse M est codée en D.C.B. (Décimal Codé Binaire), et est composée de 6 octets ; l'exposant E est un octet codé en binaire (c'est-à-dire E est compris entre -128 et 127. La position de la virgule est telle que M est un nombre fractionnaire plus petit que 1. Par exemple, le nombre N = 6328,17270 sera représenté par les 6 octets suivants :

06 | 32 | 81 | 72 | 70 | 00000100 |

la position de la virgule ↑ — l'exposant en binaire

Compte tenu du code que nous avons choisi pour les messages numériques, pour lequel le circuit d'affichage ne décode que 5 bits de chaque octet, le nombre en virgule flottante doit être traité pour pouvoir être déchiffré correctement par le circuit travaillant dans ce code.

Dans l'organigramme de la figure 22, nous avons représenté un nombre par :

$$N \equiv \{0.X_1, X_2X_3, X_4X_5, X_6X_7, X_8X_9 \ ; \ E_1E_2\}$$

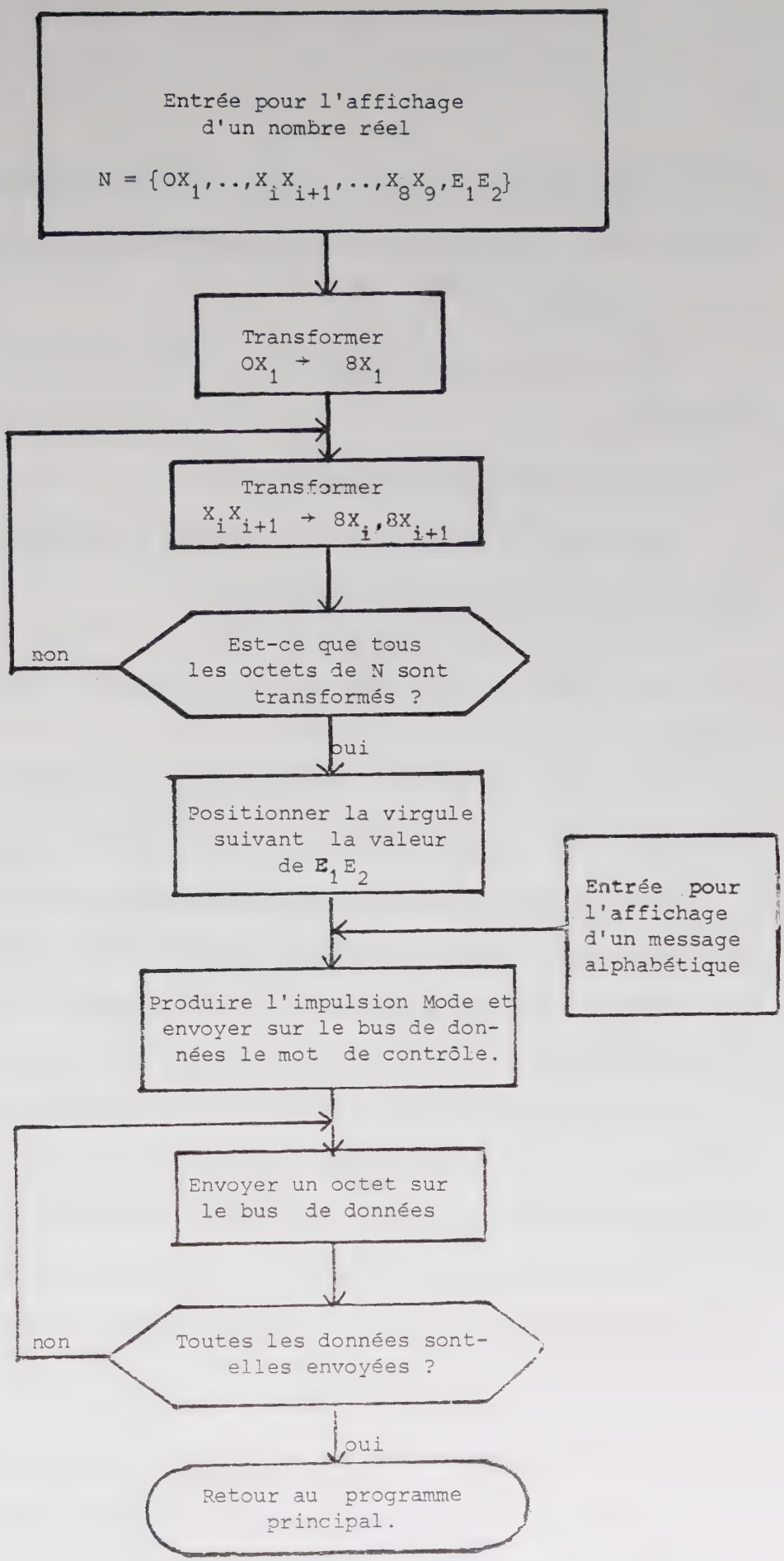

Entrée pour l'affichage d'un nombre réel
N = {OX1,..,XiXi+1,..,X8X9,E1E2}
Transformer OX1 → 8X1
Transformer XiXi+1 → 8Xi,8Xi+1
non
Est-ce que tous les octets de N sont transformés ?
oui
Positionner la virgule suivant la valeur de E1E2
Entrée pour l'affichage d'un message alphabétique
Produire l'impulsion Mode et envoyer sur le bus de données le mot de contrôle.
Envoyer un octet sur le bus de données
non
Toutes les données sont-elles envoyées ?
oui
Retour au programme principal.

Figure 22

où $O.X_1$ est le premier octet de N , composé d'une part de 4 bits nuls : O, et d'autre part des 4 bits représentant le premier nombre décimal de la mantisse de N : X_1.

X_iX_{i+1} est l'octet représentant le $i^{ème}$ et $i^{ème}$ + 1 nombres décimaux de N.

E_1E_2 est l'octet de l'exposant de N.

Le traitement de ce nombre N consiste à transformer les 8 octets de sa mantisse en 9 octets sous la forme

$$bX_1, bX_2, \ldots bX_9$$

où b est la représentation binaire d'un octal qui prend la valeur O s'il y a un point décimal à afficher, sinon il vaut 8.

Nous commençons par transformer le premier octet OX_1 en $8X_1$. Ensuite, on entre dans une boucle afin de mettre tous les autres octets de la mantisse de N sous la forme $8X_i$ sans tenir compte de la position de la virgule. Enfin, nous terminons ce traitement par positionner la virgule de N , en mettant à zéro les 4 bits de poids fort de l'octet ($8X_{E_1E_2-1}$). Notons que ce traitement n'est valable que pour les nombres plus grands que 1, ce qui est toujours notre cas.

La suite de l'organigramme est consacrée à la commande du circuit d'affichage et l'envoie sur le bus de données de 8 octets les plus à gauche du nombre N à afficher.

- Affichage d'un message alphabétique : cet affichage s'effectue sans traitement préalable. Les 8 octets correspondant à un message sont enregistrés dans une zone bien déterminée des mémoires ROM du système.

Le sous-programme d'affichage en langage d'Assembleur correspondant à l'organigramme de la figure 22 est présenté sur la page 18 de l'annexe.

γ) *La commande de l'amplification du signal de la barrette.*

Comme nous l'avons signalé au chapitre précédent, une amplification à gain variable a été réalisée pour compenser la perte du signal due, soit à la courbe de brillance de la source blanche, soit à une trop grande différence entre les intensités des deux raies de références de la lampe spectrale à He. Malheureusement, cette compensation n'est pas la même pour ces deux lampes ; il faut, en effet, amplifier, suivant la lampe utilisée, soit du côté vert du spectre (source blanche), soit du côté rouge (lampe spectrale).

Le principe de cette amplification est simple : on introduit une résistance variable dans la contre-récation d'un amplificateur opérationnel. Cette résistance variable est la résistance "Drain-Source" d'un transistor à effet de champ (figure 23) ; elle est commandée par des signaux en "dents de scie" synchronisés avec le signal de la barrette de photodiodes. Les signaux peuvent avoir, soit une pente positive, auquel cas le gain de l'amplification sera continûment croissant entre la partie verte et la partie rouge du spectre analysé, soit une pente négative, auquel cas ce sera l'inverse. Le choix entre ces deux signaux est commandé par la sortie PA5 du PIA à travers un commutateur électronique (4).

3. Les unités périphériques d'acquisition de données

Le système possède trois canaux d'acquisition : un pour le signal venant de la barrette de photodiodes et deux pour les signaux

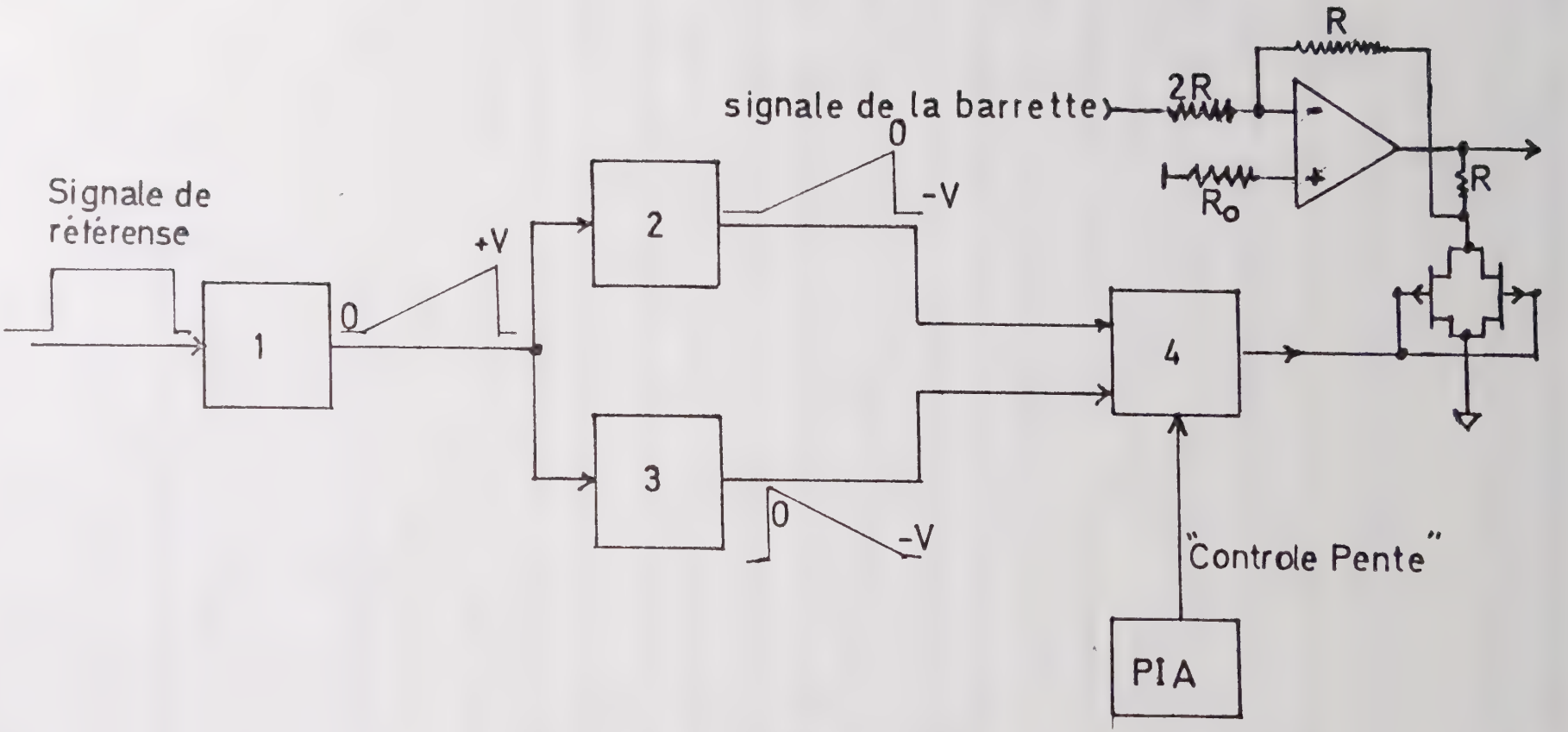

Signale de
référense
1
0
+V
2
0
-V
3
0
-V
signale de la barrette
2R
R
R_o
R
4
"Controle Pente"
PIA

FIGURE (23)

cos $2\pi\varepsilon$ et sin $2\pi\varepsilon$ venant du sigmamètre.

L'acquisition se fait par le transfert des données venant des unités périphériques vers les mémoires RAM de l'unité centrale.

En général, ce transfert nécessite la lecture de la donnée par le microprocesseur, puis son écriture en mémoire. De sorte qu'un seul transfert nécessite 10 à 15 périodes d'horloge pour le microprocesseur, soit, dans notre cas, un temps de l'ordre de 15 µsec. Cependant, les échantillons du signal de la barrette arrivant au rythme de un échantillon toutes les 4 µsec., il sera nécessaire d'accélérer le transfert en ne le faisant pas passer par les registres internes du microprocesseur.

Un tel type de transfert s'appelle "transfert par accès direct à la mémoire" ou DMA (Direct Memory Access) ; il est géré par un composant spécialisé programmable appelé DMAC (DMA Cotroller).

Dans le paragraphe suivant, nous décrirons le principe de fonctionnement de ce circuit, qui peut contrôler le transfert de quatre unités périphériques différentes. Pour cette raison, nous l'avons utilisé également pour les deux canaux relatifs aux deux signaux provenant du sigmamètre, bien qu'un transfert rapide de type DMA ne soit pas nécessaire. Nous présenterons ensuite les unités périphériques d'acquisition de données.

α) *Le transfert de données par accès direct à la mémoire : le DMAC.*

Comme nous venons de le signaler ci-dessus, ce type de transfert est géré par le circuit DMAC. Quand ce circuit reçoit une "demande de transfert" provenant de l'unité périphérique sollicitant la mémoire de l'unité centrale, il répercute cette demande au microprocesseur par un

signal "demande de DMA". L'instruction en cours alors s'achève. Puis, le microprocesseur informe le circuit DMAC, par un signal appelé "autorisation de DMA", qu'il lui abandonne le contrôle des bus de données et d'adresses. Le circuit DMAC envoie alors à l'unité périphérique l'information "autorisation de transfert" et prend le contrôle des opérations pour assurer un transfert unité périphérique - mémoire (ou l'inverse).

Le circuit DMAC que nous avons utilisé est le contrôleur DMA MOTOROLA 6844. Ce contrôleur possède trois modes de transfert DMA ; parmi eux nous avons choisi celui qui est le mieux adapté à notre système, c'est-à-dire celui qui donne la plus grande rapidité de transfert. Dans ce mode, appelé DMA groupé, le microprocesseur est arrêté pendant toute la durée du transfert ; le DMAC peut alors effectuer le transfert de deux façons différentes suivant que les données arrivent sur le bus à un rythme synchrone ou asynchrone de l'horloge du système. Dans le premier cas, le transfert s'effectue à la vitesse maximum (10^6 données/seconde). Dans le second cas, il est mis en attente et ne commandera le transfert que lorsque les données à transférer seront présentes sur le bus.

Dans le paragraphe suivant, nous allons voir que l'acquisition de données par le contrôleur DMA nécessite une parfaite synchronisation entre les échantillons du signal de la barrette de photodiodes et les différents signaux de commande de transfert par DMA. La figure 24 présente le diagramme de temps des différents signaux correspondant au transfert DMA groupé.

Nous faisons les remarques suivantes :

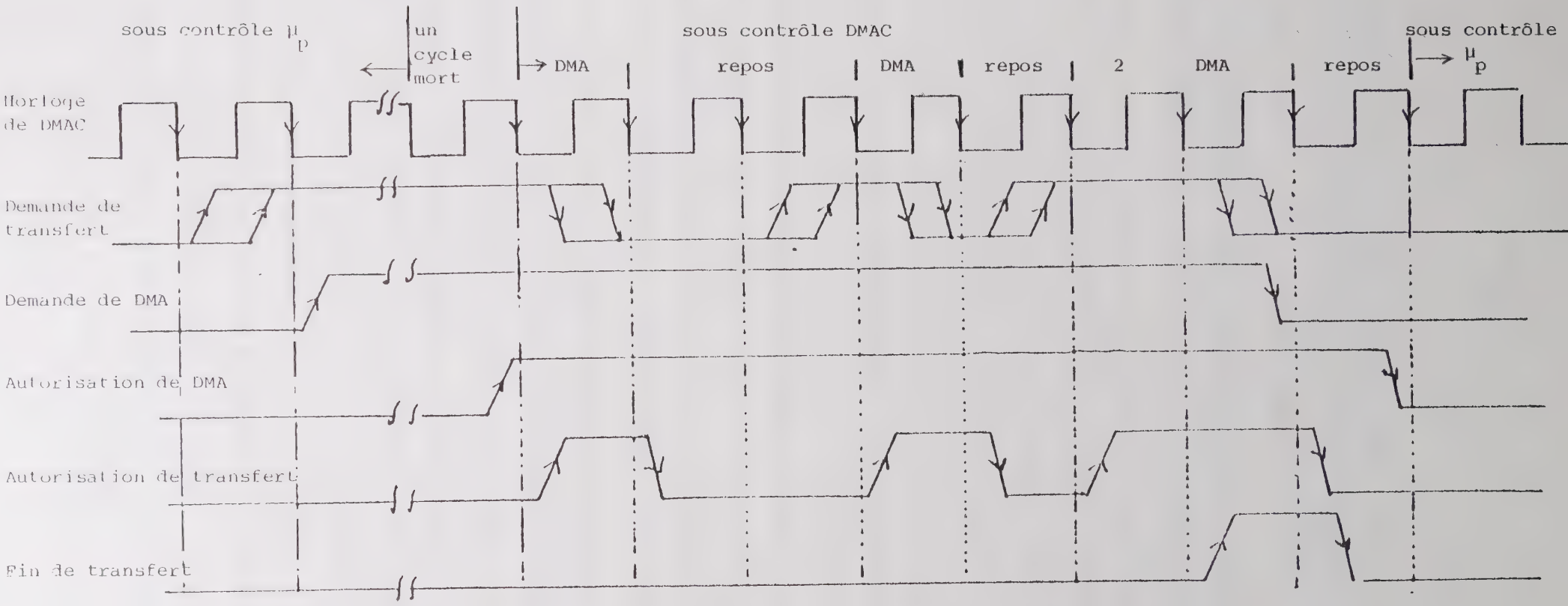

sous contrôle μ_p
un
cycle
mort
DMA
sous contrôle DMAC
repos
DMA
repos
2
DMA
repos
sous contrôle
μ_p
Horloge
de DMAC
Demande de
transfert
Demande de DMA
Autorisation de DMA
Autorisation de transfert
Fin de transfert

Figure 24

. Le processus de transfert est synchronisé sur les transitions négatives des impulsions de l'horloge ;

. une autorisation de transfert est émise à condition que l'état logique de deux signaux "autorisation de DMA" et "demande de DMA" soit à "1" ;

. une impulsion est émise par le DMAC pour signaler la fin de transfert. Ceci est produit quand un registre compteur , interne au DMAC, qui, au début du transfert contient le nombre des données à transférer, arrive à zéro.

β) *L'unité périphérique d'acquisition du signal de la barrette de photodiodes*

Cette unité d'acquisition comprendra principalement un convertisseur analogique/numérique, un registre tampon entre le convertisseur et le bus de données, et le contrôleur DMA. L'"échantillonneur/bloqueur" (E/B) est contenu dans le circuit électronique associé à la barrette.

Le problème principal de cette acquisition est la réalisation de la parfaite synchronisation entre le signal de la barrette et les signaux de commande d'un transfert de type DMA. Ce problème de synchronisation vient de ce que le processus d'acquisition est déclenché par la commande "start acquisition" d'une façon asynchrone avec le signal de la barrette.

Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé deux signaux de commande émis par les circuits électroniques de la barrette appelés "start out" et "shunt plus". Le premier est une impulsion qui déclenche la "lecture" des signaux optiques reçus par les photodiodes de la barrette. Le deuxième est un signal de référence dont les impulsions

positives coïncident avec les échantillons du signal. Entre l'impulsion "start out" et le premier échantillon, il y a 4 transitions positives du signal "shunt plus".

Nous avons représenté l'organigramme qui montre le déroulement du processus de l'acquisition du signal de la barrette sur la figure 25. Sur la figure 26, nous avons représenté un schéma de principe du montage électronique de l'unité périphérique de l'acquisition de ce signal.

Le PIA reçoit, comme nous l'avons vu au paragraphe B.2.β, la commande "start acquisition". Un sous-programme commande au microprocesseur d'envoyer une demande de transfert au DMA par une des lignes de sorties du PIA. Cette demande est transmise par un circuit logique représenté par le rectangle 4 de la figure 26. Le DMAC envoie alors une demande de DMA au microprocesseur qui répond par le signal "autorisation de DMA". La transmission de ce signal au DMAC suit alors les étapes a, b et c de l'organigramme précédent ; ces étapes sont réalisées par les trois ensembles de circuits logiques représentés par les rectangles 1, 2 et 3 de la figure 26. Le DMAC, à ce moment-là, reçoit continuellement des demandes de transfert synchronisées par le signal "start plus" et transmises par le circuit logique 4.

Si la source lumineuse utilisée est un laser fonctionnant en régime impulsionnel, le processus d'acquisition doit être complété. En effet, les photodiodes de la barrette sont éclairées avec la lumière dispersée par le spectrographe et sont lues les unes après les autres par le système. Donc, si la lecture de ces photodiodes débute avant l'arrivée de l'impulsion lumineuse, le résultat peut être erronné. Nous avons conçu notre système électronique de sorte qu'une lecture

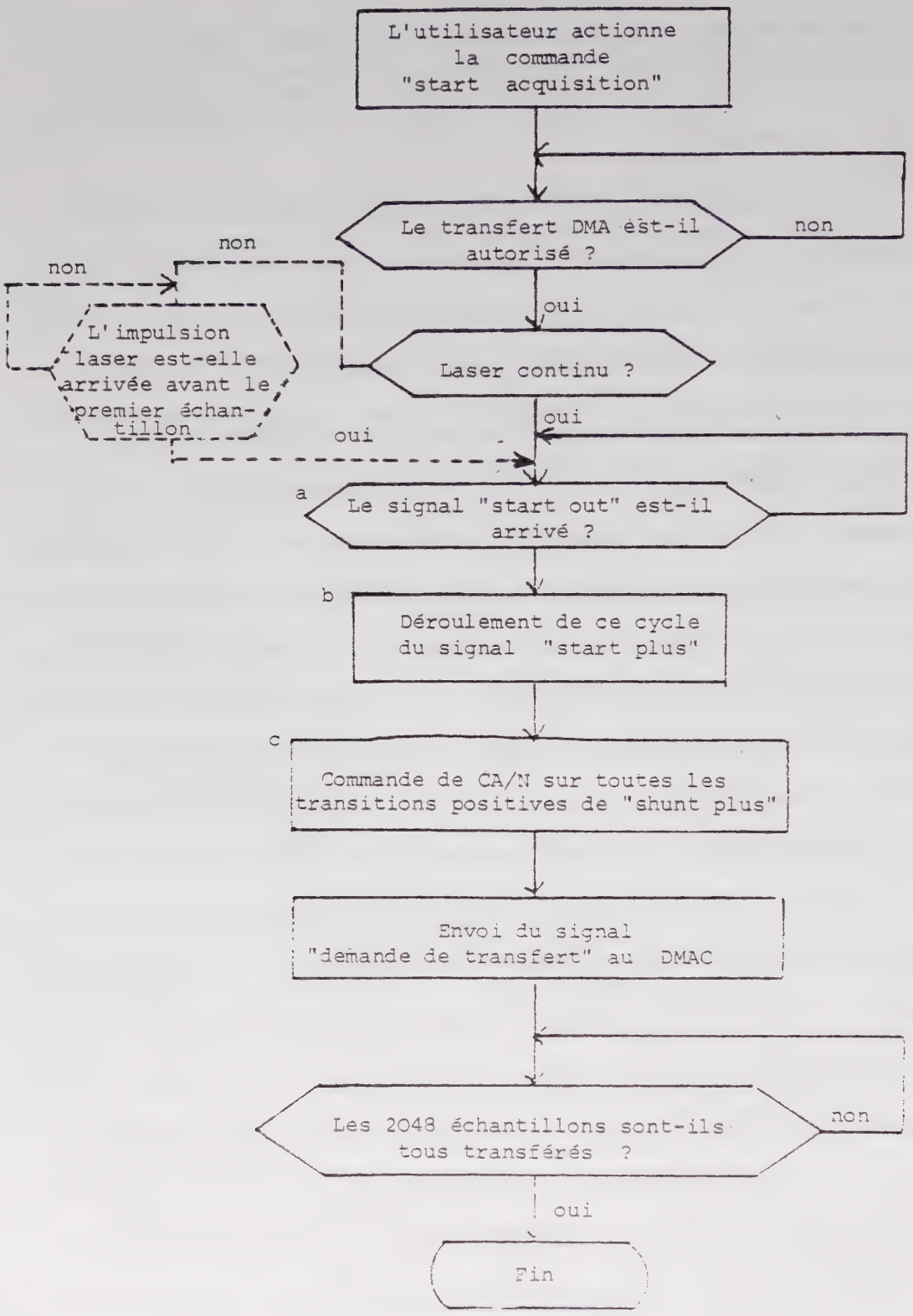

L'utilisateur actionne la commande "start acquisition"
Le transfert DMA est-il autorisé ?
non
oui
Laser continu ?
non
oui
L'impulsion laser est-elle arrivée avant le premier échantillon
non
oui
a
Le signal "start out" est-il arrivé ?
b
Déroulement de ce cycle du signal "start plus"
c
Commande de CA/N sur toutes les transitions positives de "shunt plus"
Envoi du signal "demande de transfert" au DMAC
Les 2048 échantillons sont-ils tous transférés ?
non
oui
Fin

Figure 25

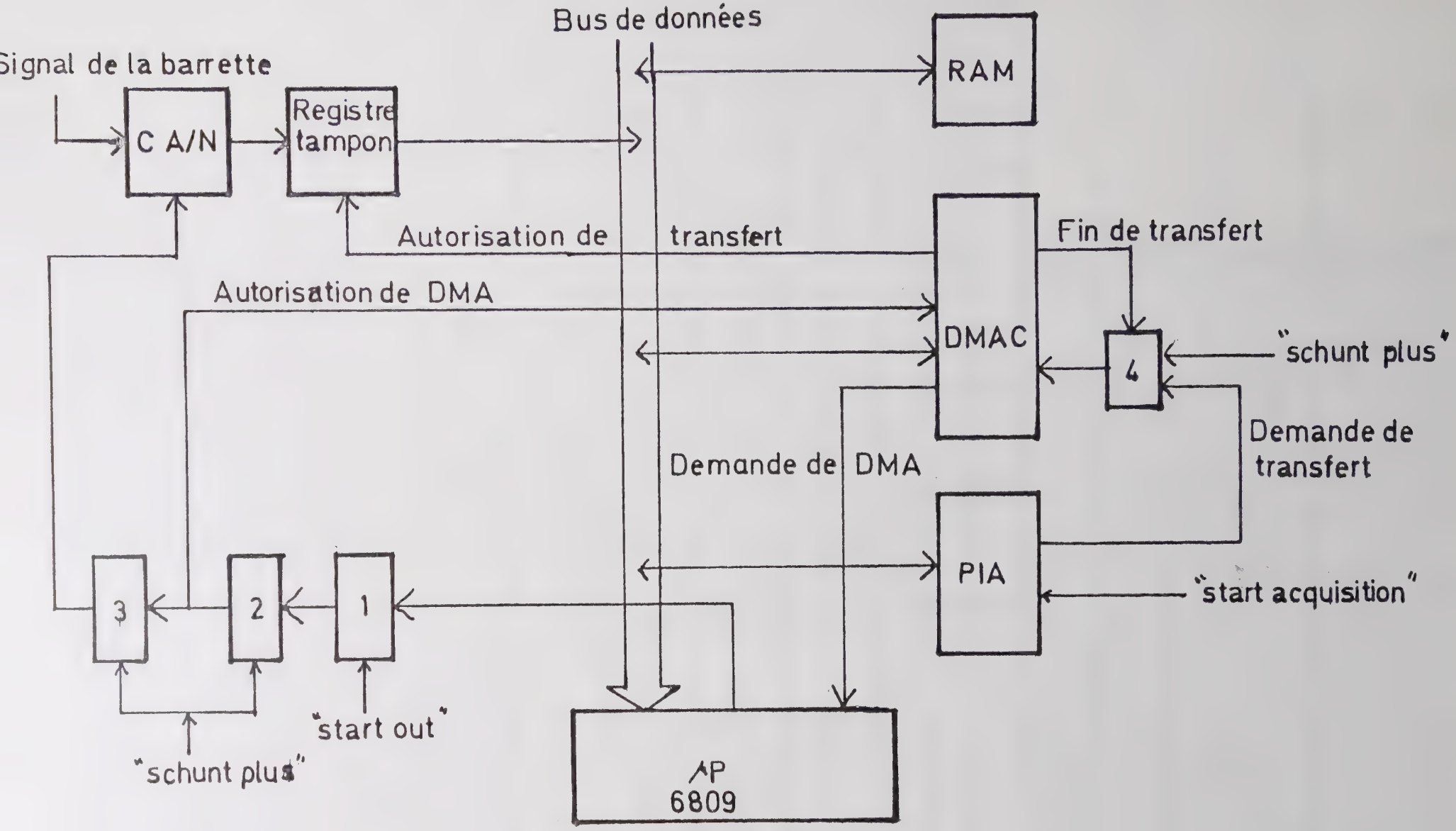

Bus de données
Signal de la barrette
RAM
C A/N
Registre tampon
Autorisation de transfert
Fin de transfert
Autorisation de DMA
DMAC
4
"schunt plus"
Demande de transfert
Demande de DMA
PIA
"start acquisition"
3
2
1
"start out"
"schunt plus"
AP 6809

FIGURE (26)

n'est prise en compte que si elle débute alors qu'une photodiode de référence est déjà éclairée par une impulsion du laser.

Cette condition supplémentaire est dessinée en pointillé sur l'organigramme de la figure 25.

γ) *Les unités périphériques d'acquisition des signaux* $\sin 2\pi\varepsilon$ *et* $\cos 2\pi\varepsilon$.

Ces deux unités d'acquisition sont composées de deux chaînes symétriques. La figure 27 représente un schéma de principe de l'une d'entre elles : l'unité d'acquisition du signal $\cos 2\pi\varepsilon$.

Le convertisseur analogique/ numérique (CA/N) utilisé est conçu pour être connecté directement sur le bus de données du système. Le processus d'acquisition est déclenché par la commande "start acquisition"; un sous-programme se charge alors de faire envoyer deux impulsions pour commander successivement l'échantillonneur/bloqueur (E/B) et le CA/N. La demande de transfert est émise alors par la combinaison des deux signaux : commandesde conversion et de fin de conversion. Les deux circuits logiques (1 et 2) sont les mêmes que les circuits (1 et 2) de la figure 24. Le circuit logique (3) permet d'une part la transmission de la commande de conversion du CA.N et d'autre part le maintien du résultat de la conversion sur le bus de données jusqu'à la fin du transfert du signal $\cos 2\pi\varepsilon$.

Les photos 12, 13 et 14 représentent les différents constituants du matériel du système. La photo 12 représente d'une part l'électronique associée à la barrette de photodiodes (la carte à gauche), et d'autre part l'amplificateur à gain variable et l'électronique des relais

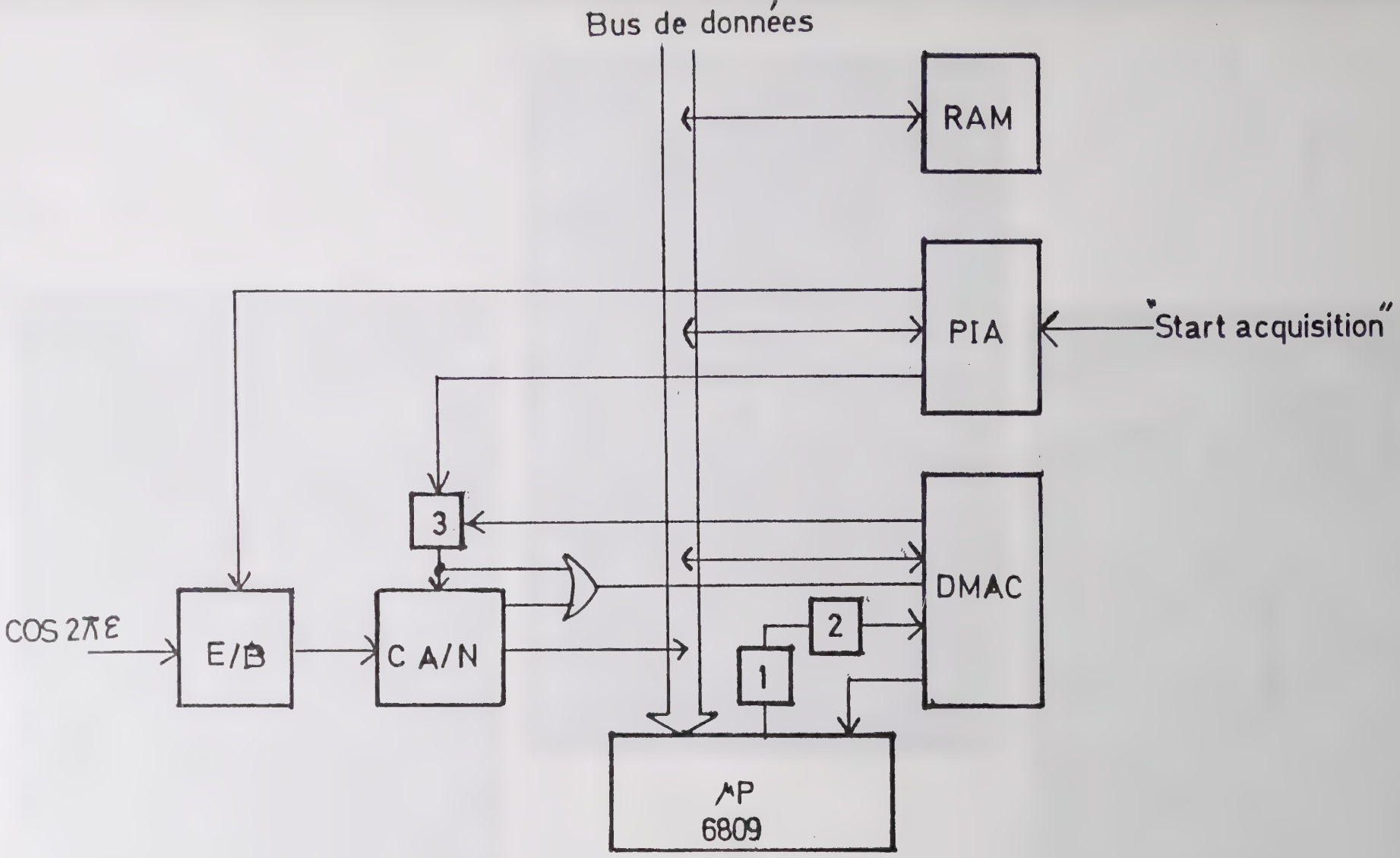
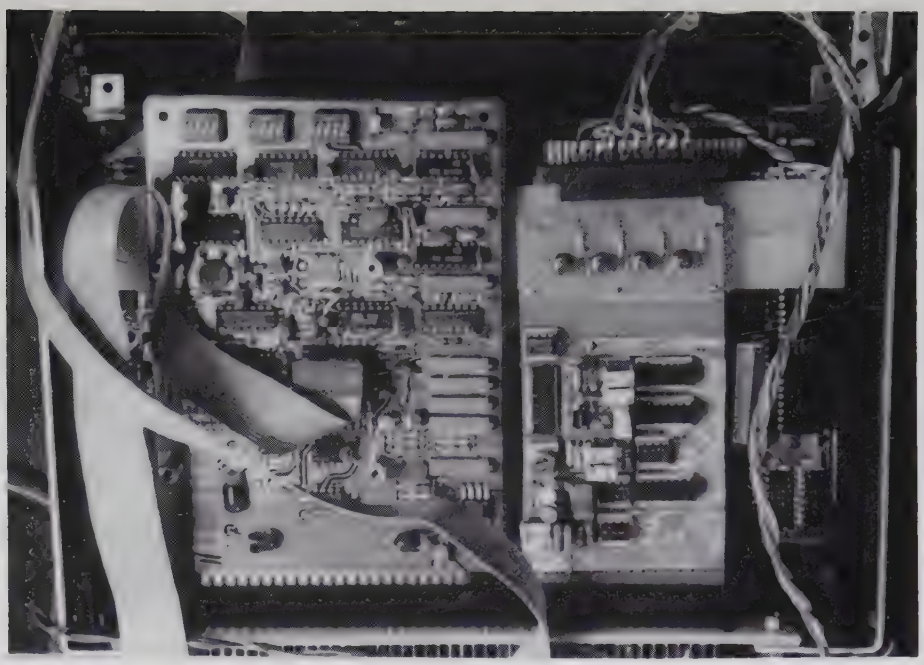

Bus de données
RAM
PIA
"Start acquisition"
DMAC
3
2
1
COS 2ΠE
E/B
C A/N
ΛP
6809

FIGURE (27)

PHOTO 12

L'Interface Barrette.
Système
Microinformatique.



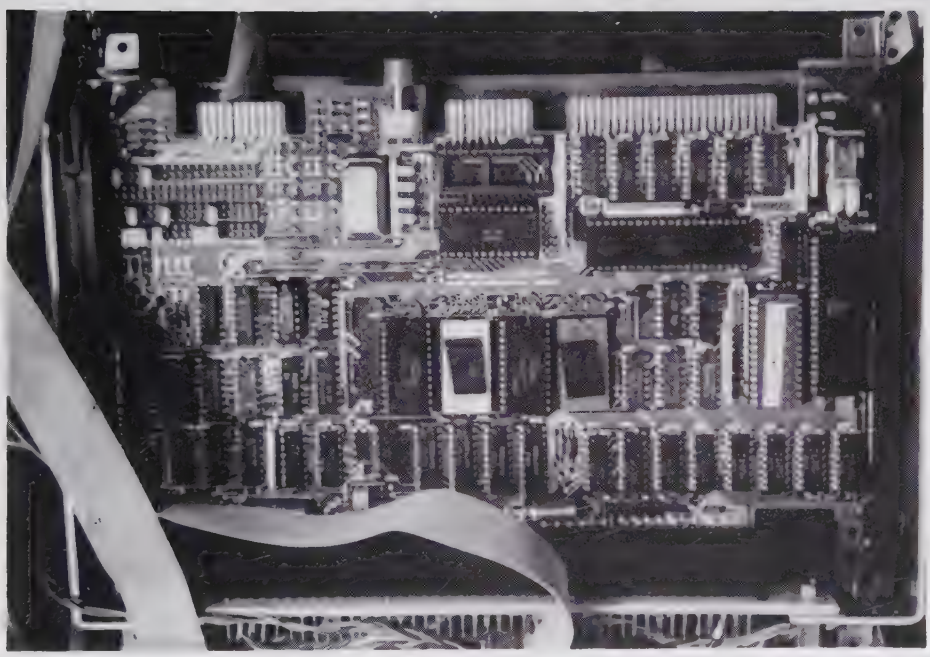
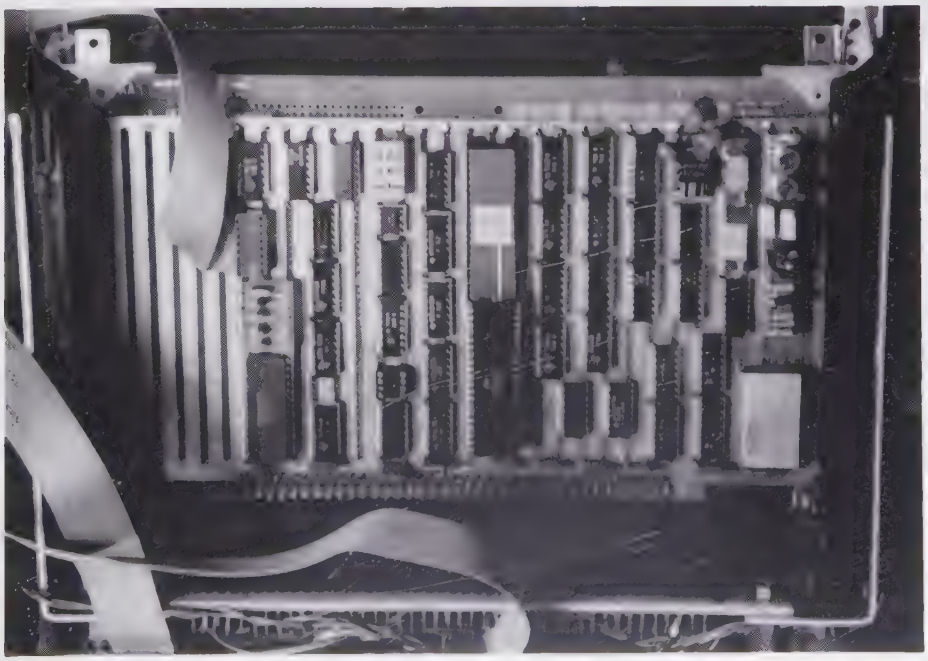


PHOTO 13

L'Unité Centrale.

PHOTO 14

Le Système
d'acquisition
de données.



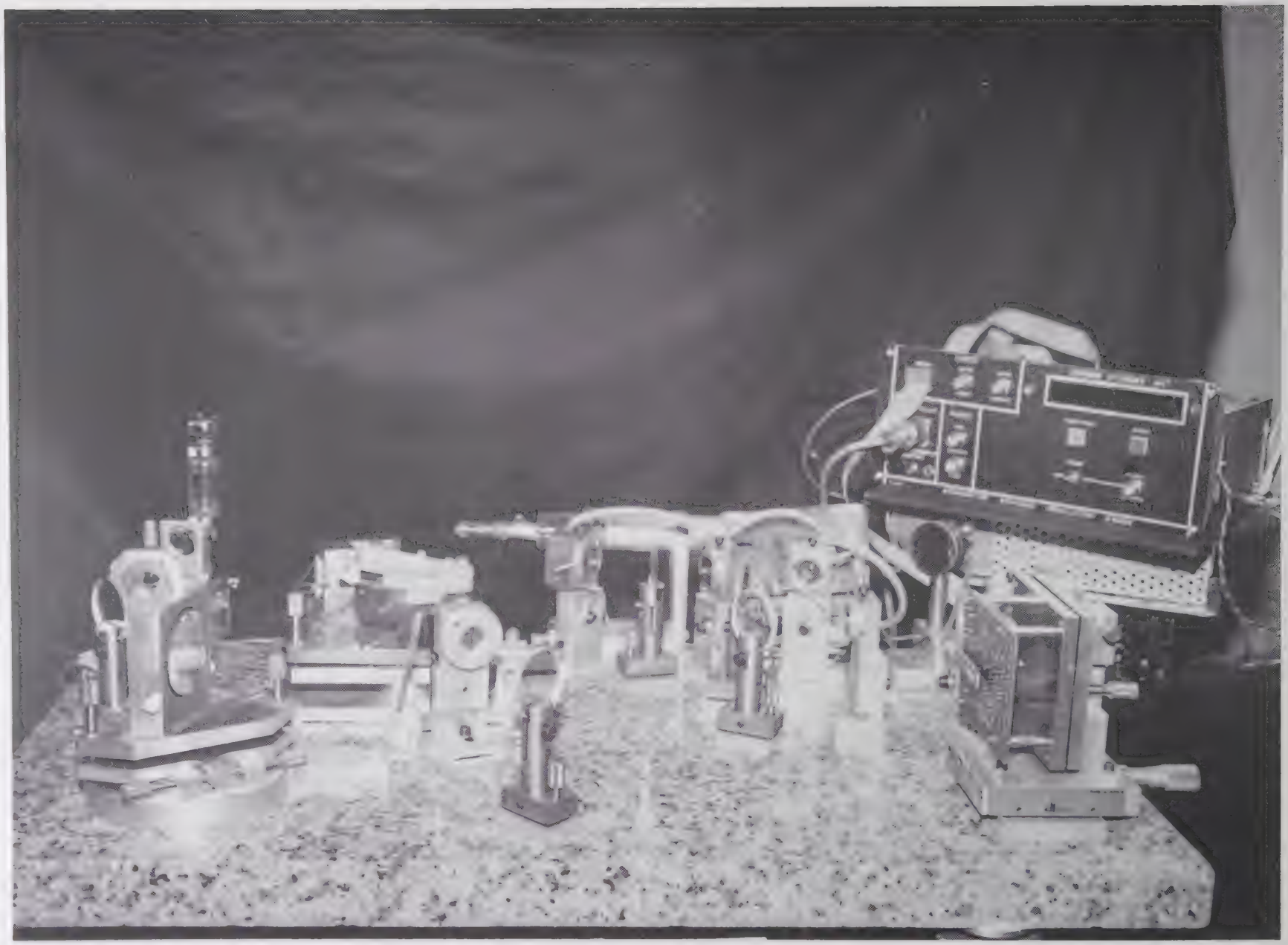


PHOTO 15

(la carte à droite). La photo 13 représente l'unité centrale, c'est-à-dire le microprocesseur et les mémoires. La photo 14 représente les unités périphériques du système.

La photo 15 représente l'appareil avec ces deux parties optique et électronique.

C - LE PROGRAMME PRINCIPAL ET LES SOUS-PROGRAMMES DE TRAITEMENT NUMERIQUE

Le langage de programmation que nous avons choisi est l'assembleur qui permet de minimiser le temps de compilation et d'optimiser le temps d'exécution du programme. Cette rapidité sera nécessaire pour l'introduction de l'appareil dans une boucle d'asservissement d'une fréquence d'un laser.

Nous nous limitons, dans ce paragraphe, à la description de l'organigramme du programme principal et celles de deux sous-programmes (SP) de traitement particulièrement significatif dans notre application. Le premier SP calcul l'excédent fractionnaire ε à partir de deux quantités $\sin 2\pi\varepsilon$ et $\cos 2\pi\varepsilon$, et le second transforme un nombre binaire de 16 bits non signé en 5 chiffres DCB.

Nous avons mis en annexe les textes du programme principal et ses SP, sauf ceux du calcul des quatre opérations mathématiques de base (+, -, ./. et x) qui sont bien connus.

1. L'organigramme du programme principal

Nous avons représenté sur les figures 28 A, B, C, D et E l'organigramme des différentes étapes de l'exécution du programme principal (PP).

Etape A : c'est l'étape d'initialisation et de choix de fonctionnement (figure 28 A). Après avoir mis en marche le système, le programme teste une des entrées du PIA : si cette entrée est à zéro, le système suit le programme que nous avons mis au point et qui se trouve dans les mémoires ROM. Si cette entrée est à 1, l'utilisateur peut modifier ce programme. Dans ce cas, le système est sous contrôle d'un moniteur, celui-ci aidera l'utilisateur à tester l'exécution d'un programme (mis dans les mémoires RAM) en travaillant pas à pas ou en mettant des points d'arrêt après ou avant les opérations à tester. A la fin de cette phase de mise au point, l'utilisateur, s'il veut exécuter son programme sans l'aide du moniteur, doit enregistrer son programme dans des mémoires ROM.

Le début de chacune des étapes suivantes possède une partie de programme commune : c'est la "préparation à l'acquisition", dans laquelle le PP programme le DMAC, affiche un message pour signaler la source lumineuse à utiliser, positionne convenablement les relais et, finalement, attend la commande "start acquisition". Nous n'avons représenté cette partie commune qu'une seule fois sur la figure 28 B encarts 1, 2, 3, 4, 5 et 6.

Etape B (figure 28 B) : dans cette étape, le PP fait l'acquisition et le traitement numérique du signal de la lampe spectrale. Comme nous venons de le signaler, au début de cette étape le PP exécute la "préparation à l'acquisition" qui, pour programmer le DMAC et afficher le message "SPECTRE", fait appel à deux SP : "DMAC" et "AFFDIG". Ensuite, le PP entre dans une boucle pour attendre la commande "start acquisition".

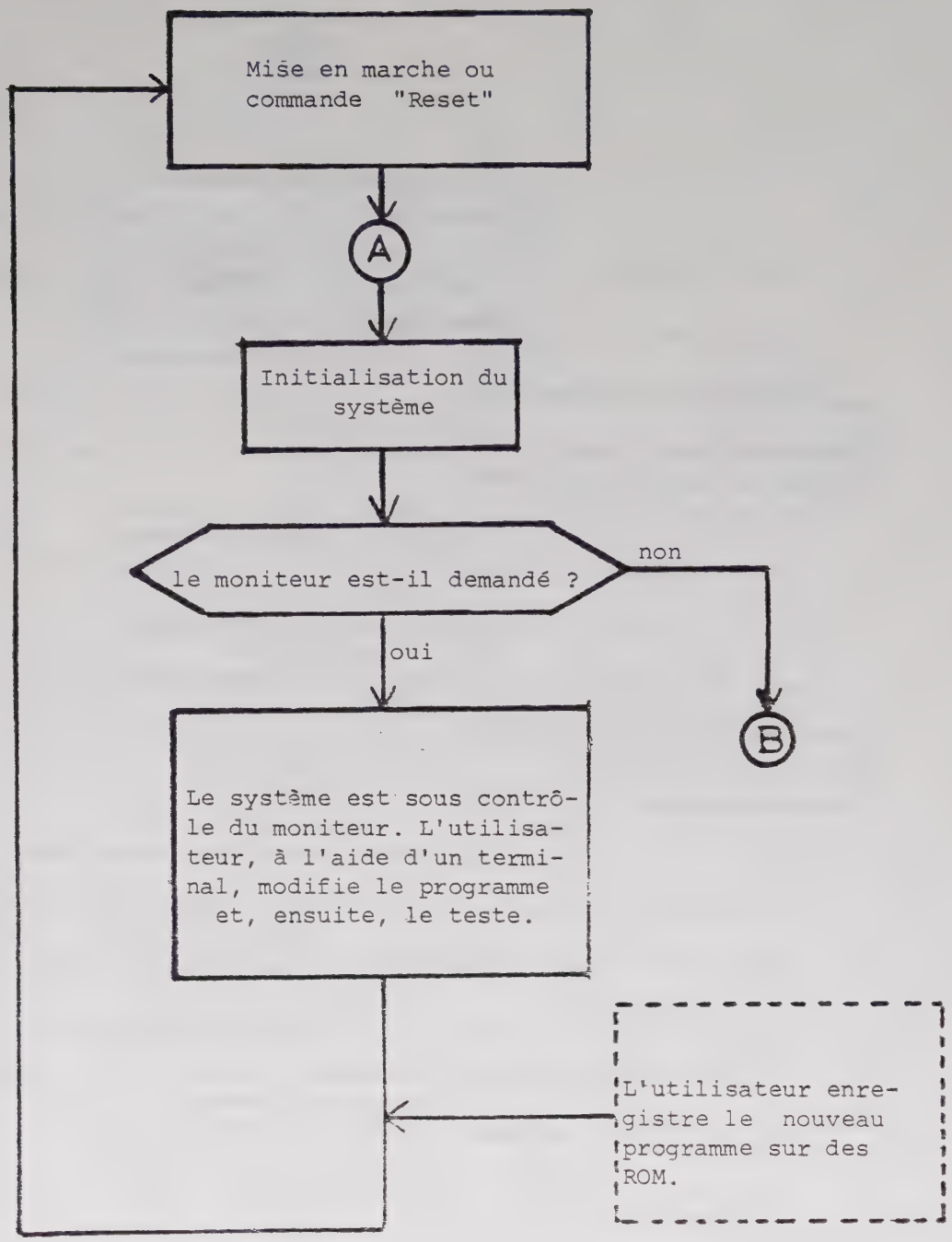


Figure 28 A

L'étape d'initialisation et de choix de fonctionnement.

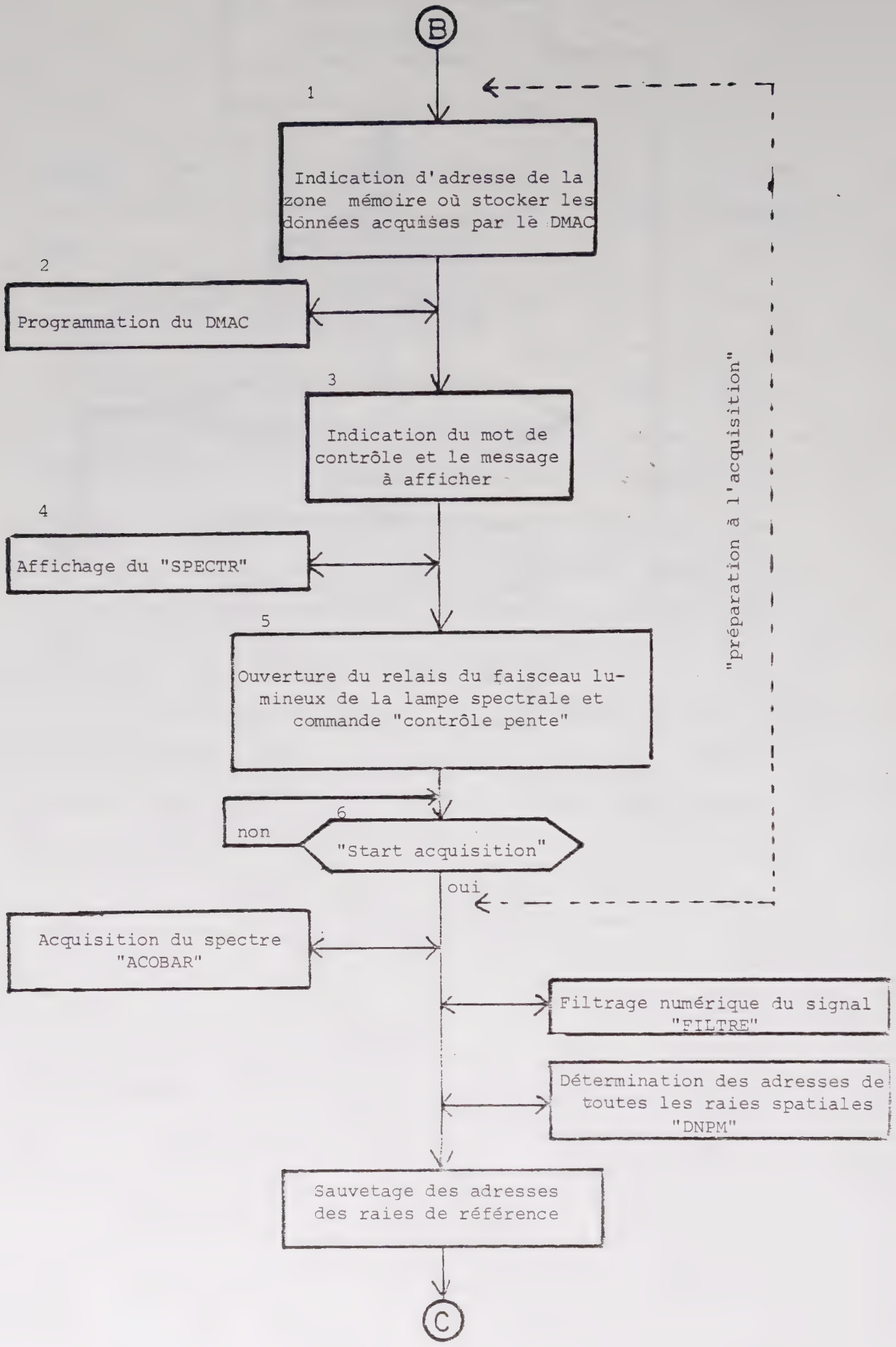

B
1
Indication d'adresse de la zone mémoire où stocker les données acquises par le DMAC
2
Programmation du DMAC
3
Indication du mot de contrôle et le message à afficher
4
Affichage du "SPECTR"
5
Ouverture du relais du faisceau lumineux de la lampe spectrale et commande "contrôle pente"
6
non
"Start acquisition"
oui
"préparation à l'acquisition"
Acquisition du spectre "ACOBAR"
Filtrage numérique du signal "FILTRE"
Détermination des adresses de toutes les raies spatiales "DNPM"
Sauvetage des adresses des raies de référence
C

Figure 28 B

Puis le PP, après avoir reçu la commande d'acquisition, transfère le signal de la barrette à l'aide d'un SP "ACQBAR". Puis, en appelant un SP "FILTRE", il met à zéro toutes les valeurs inférieures ou égales à 7 du signal reçu. Cette opération permet de distinguer les maximums du signal reçu de ceux du bruit de fond qui l'accompagne. Enfin, à l'aide de "DNPM" (Détermination du Nombre et des Positions des Maximums), le PP détermine l'adresse de toutes les raies spectrales du signal, et il garde seulement en mémoire les adresses des deux raies de références, c'est-à-dire celle de la première et celle de la dernière raie, désignées respectivement par ρ_1 et ρ_2.

Etape C (figure 28 c) : dans cette étape, le PP fait l'acquisition du signal d'un spectre cannelé. Il commence par programmer le DMAC, puis il affiche le message "S. BLANCHE" et, ensuite, il ouvre le relais du faisceau de la lumière blanche et ferme celui de la lampe spectrale. Sur ordre de l'utilisateur, le PP fait l'acquisition du signal du spectre cannelé, puis il fait appel à plusieurs SP afin de déterminer la différence des ordres d'interférences pour les deux positions des raies de référence : "DNPM", "CALFRC" et "CLNBM". Pour calculer l' excédent fractionnaire ε_1 , "DNPM" détermine les adresses des deux maximums du spectre cannelé (M_{11}, M_{12}) qui suivent la raie ρ_1, et "CALFRC" en déduit la valeur de ε_1

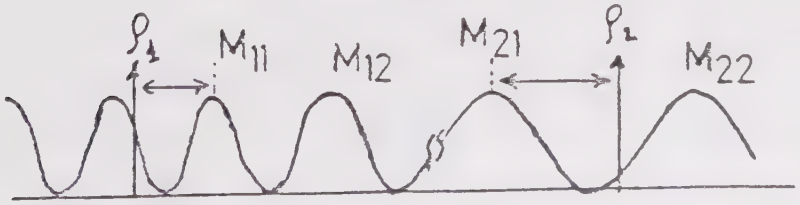


Figure 29

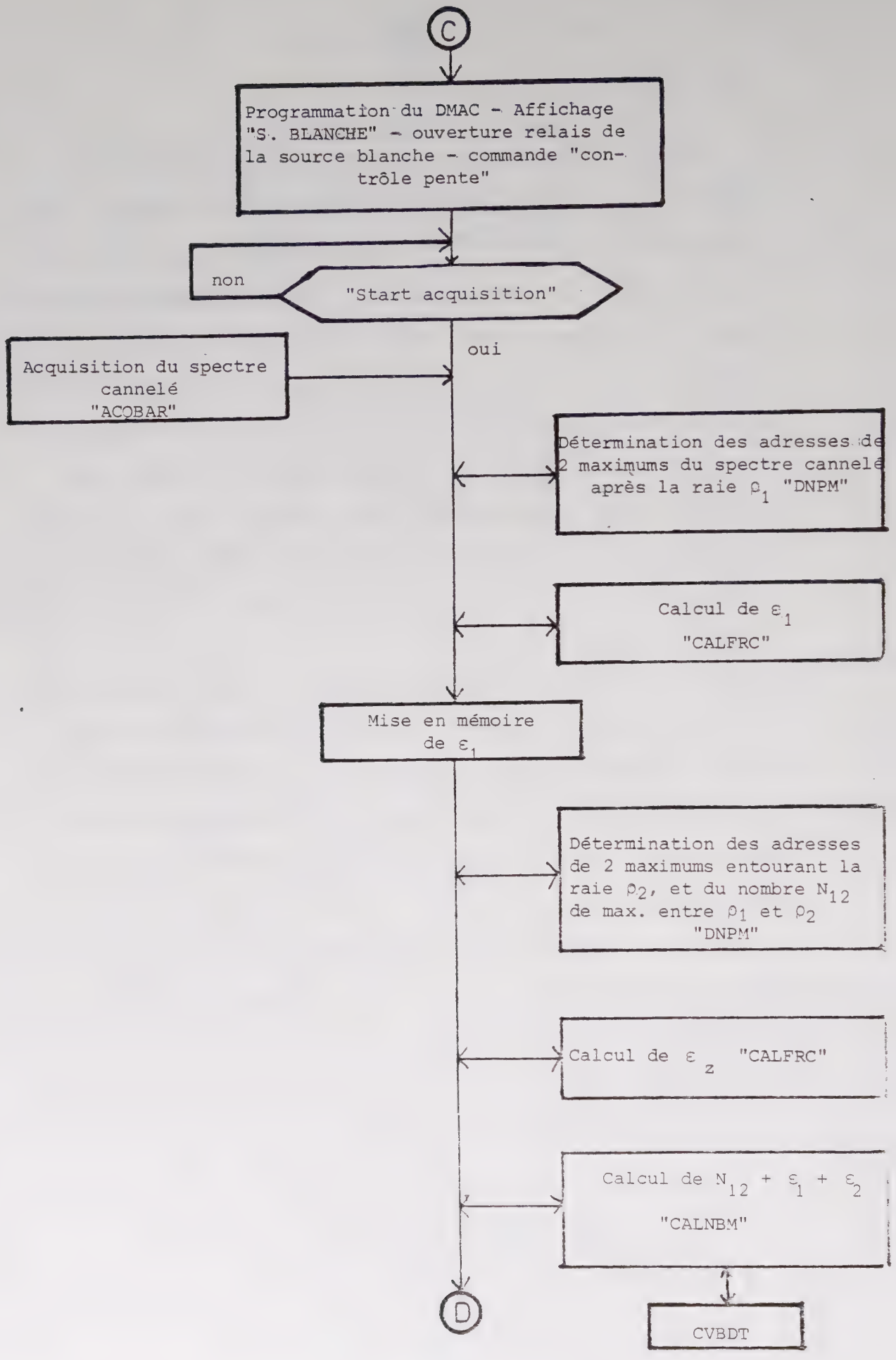


Figure 28 C

Acquisition et traitement du spectre cannelé.

Ensuite "DNPM", dans un nouvel appel, détermine le nombre de maximums N_{12} entre les deux raies ρ_1 et ρ_2 et les adresses des deux maximums du spectre cannelé entourant P_2 (M_{21}, M_{22}) ; ce qui, à l'aide de "CALFRC", permet de calculer le complément de l'excédent fractionnaire ε_2 (figure 29). Enfin, le dernier SP "CLNBM" calcule le nombre $N_{12} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2$; ce SP utilise un autre SP "CVBTD" qui convertit un nombre binaire non signé de 16 bits en 5 digits DCB ; cette conversion est nécessaire pour transformer le nombre de maximums N_{12} représenté en binaire en représentation DCB, opération nécessaire pour poursuivre les calculs.

Etape D (figure 28 D) : dans cette étape, le PP calcule la différence de marche δ de l'interféromètre de Michelson du sigmamètre. Après avoir exécuté la partie "préparation à l'acquisition" déjà signalée, l'utilisateur voit le message "He-Ne" sur les afficheurs. Après avoir reçu la commande "start acquisition", le PP transfère les deux signaux sin $2\pi\varepsilon$ et cos $2\pi\varepsilon$ provenant du sigmamètre vers les mémoires. Cette acquisition est effectuée à l'aide de "ACQSIN". Puis le PP appelle un SP dit "EPS" afin de calculer l'excédent fractionnaire ε_{He-Ne} ; ce SP "EPS" utilise un autre SP qui calcule la fonction Arctg(x). Cette fonction peut être approximée par la relation [7] :

$$\text{arctg } x = \frac{x}{1 + 0{,}28\ x^2} + \theta(x) \qquad \text{pour} \quad |x| \leq 1$$

$$\text{où} \qquad |\theta(x)| \leq 5\ 10^{-3}$$

Cette incertitude $\theta(x)$ est inférieure à celle prévue pour notre appareil qui est 1 % de 2π soit $7\ 10^{-2}$. Rappelons que "EPS" sera

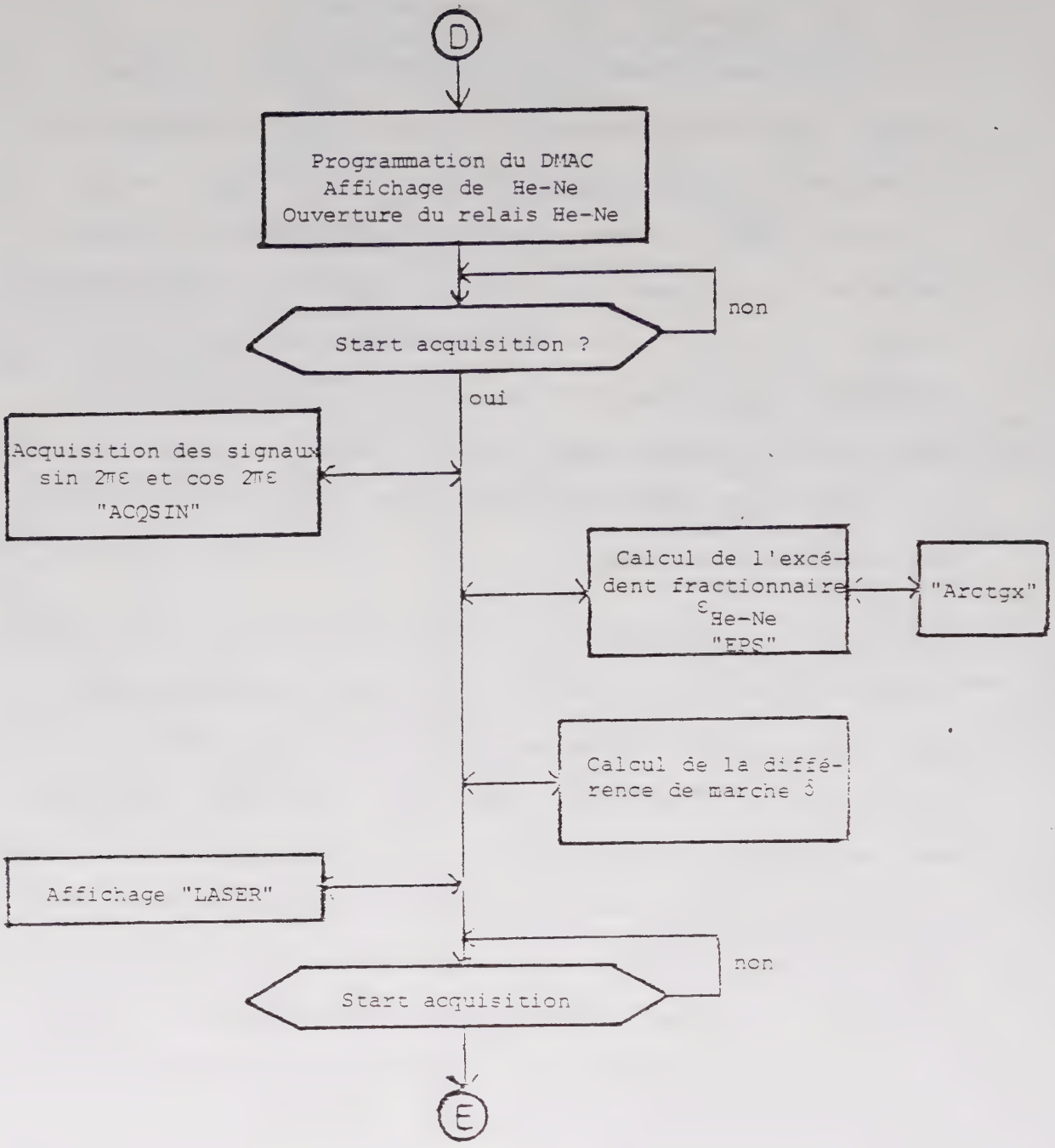


Figure 28 D

Calcul de la D.D.M. δ̂

décrit dans le paragraphe suivant. Ensuite le PP calcule la différence de marche δ et, enfin, il affiche le message "LASER" pour indiquer que le système est prêt à commencer la mesure ; il attend alors la commande "start acquisition" pour exécuter la dernière étape de cet organigramme.

Etape E (figure 28 E) : Dans cette étape, le PP mesure et affiche le nombre d'ondes du laser. Les SP utilisés dans cette étape ont déjà été décrits dans les étapes précédentes. Le PP demande leur exécution dans l'ordre montré sur la figure 28 E. Cette étape est perpétuellement recommencée jusqu'à ce que l'utilisateur interrompe les mesures en appuyant sur la commande "Arrêt". Cette commande fait appel à un SP d'interruption où le système attend la commande "start acquisition" pour continuer la mesure.

2. L'organigramme du sous-programme "EPS"

La fonction de ce sous-programme est de calculer l'excédent fractionnaire ε à partir des deux signaux $\sin 2\pi\varepsilon$ et $\cos 2\pi\varepsilon$ provenant du sigmamètre. Sur la figure 30, nous avons représenté l'organigramme de ce calcul. Le SP compare les valeurs absolues de $\sin 2\pi\varepsilon$ et $\cos 2\pi\varepsilon$ et, suivant leurs grandeurs respectives, calcule en exécutant les opérations montrées sur l'organigramme de la figure 29.

3. L'organigramme du sous-programme "CVBTO"

Le but de ce sous-programme est de convertir un nombre binaire de 2 octets en un nombre en DCB de 5 chiffres ayant chacun 4 bits. Cette conversion est nécessaire parce que nos signaux sont décodés en

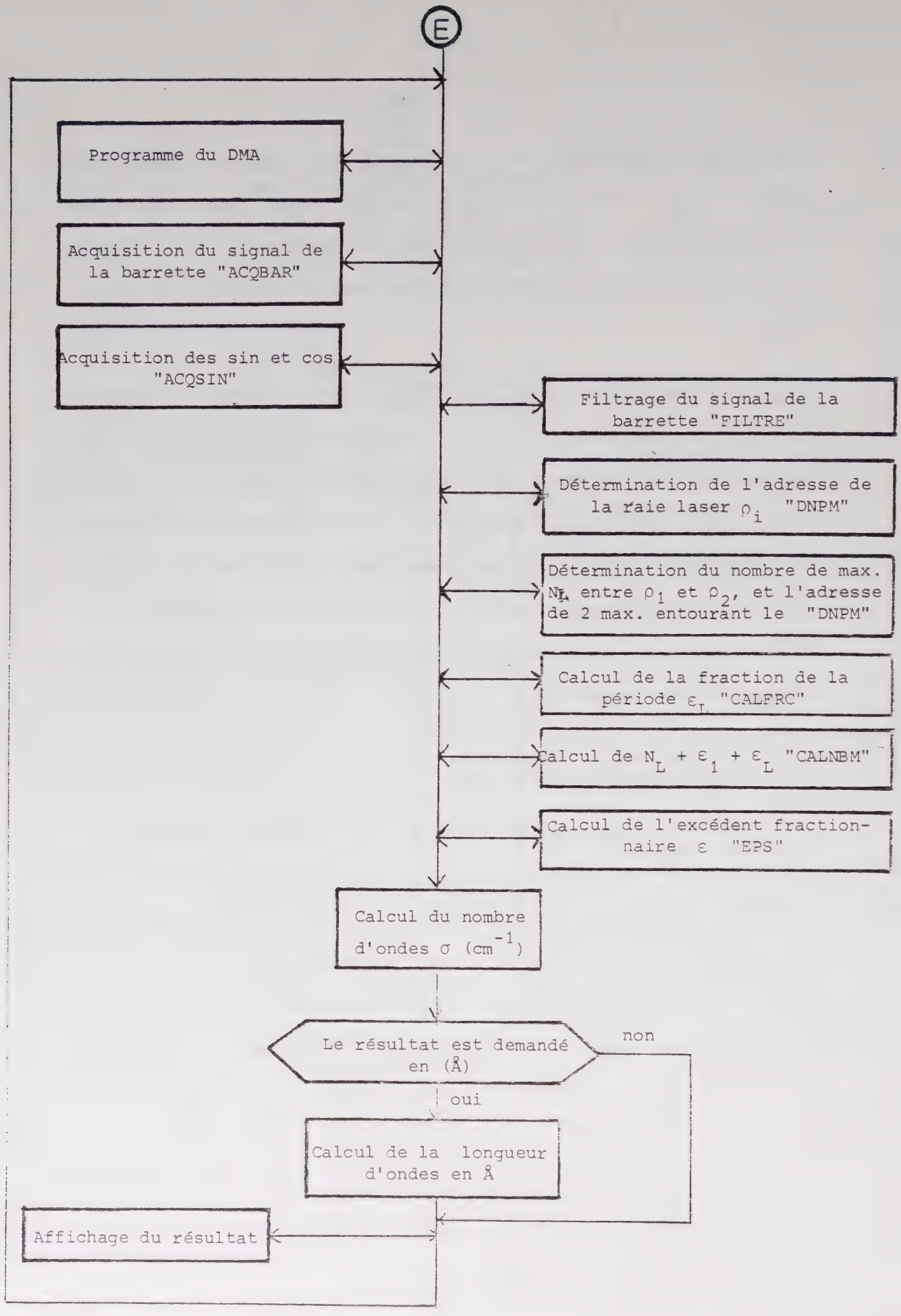


Figure 28 E

Mesures de la raie laser

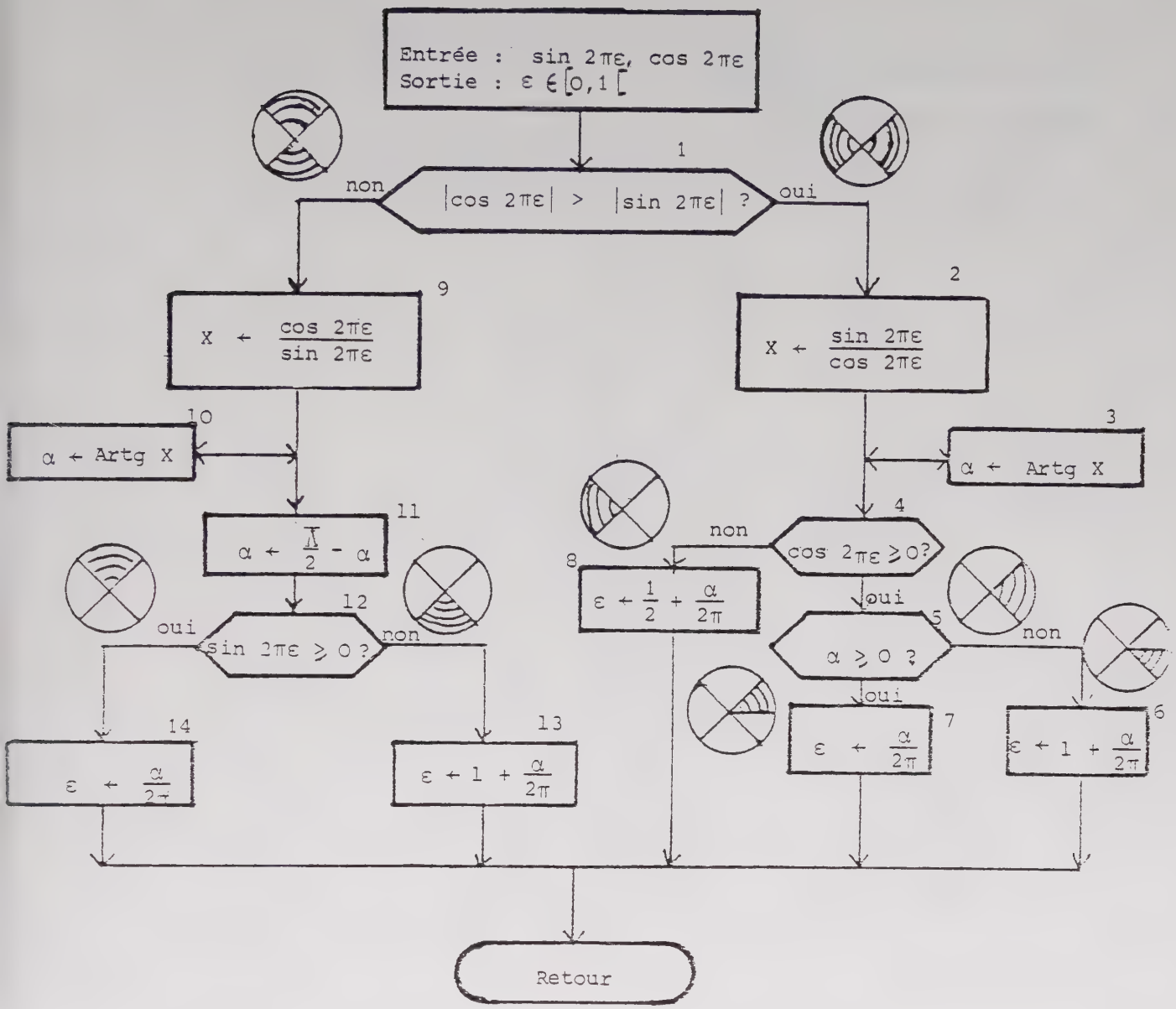


Figure 30

Calcul de l'excédent fractionnaire "EPS"

nombres binaires, alors que les opérations arithmétiques sont programmées en nombres DCB.

Sur la figure 31, nous trouvons l'organigramme de ce SP.

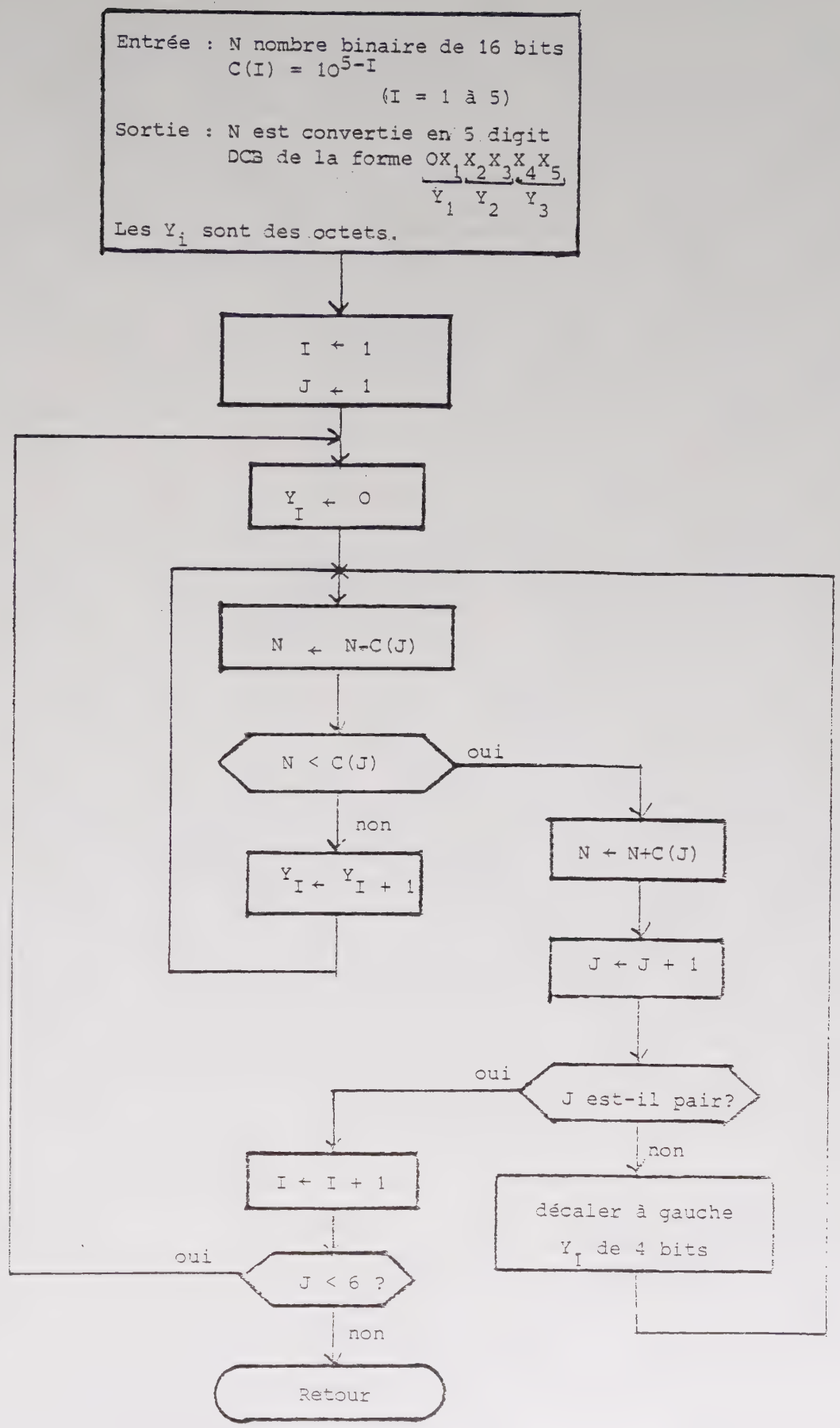


Figure 31

Conversion binaire en DCB "CVBTD"

CHAPITRE VI

RESULTATS EXPERIMENTAUX

VI - RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous présentons dans ce chapitre quelques expériences qui ont permis de tester les propriétés de l'instrument. Dans ce but, nous lui avons envoyé d'une part le faisceau d'une source laser continue et, d'autre part celui d'une source fonctionnant en impulsion.

A. EXPERIENCE FAITE AVEC UNE SOURCE CONTINUE

Cette source, dont la fréquence est parfaitement connue à la précision des mesure, a été soit un laser He-Ne fonctionnant à 611,8 nm, soit un laser à colorant monomode dont la fréquence a été calée sur l'une ou l'autre des raies de résonance D_1 et D_2 d'une lampe à sodium. Ce calage a été effectué de façon assez précise en observant la fluorescence émise par la lampe chaude mais éteinte lorsque la fréquence du laser est parfaitement accordée.

Nous avons ainsi pu observer que la longueur d'onde du rayonnement laser mesurée à l'aide de notre appareil fluctue d'une mesure à l'autre autour de la valeur vraie sans cependant s'en écarter de plus de 0.03 Å. Il faut signaler que l'instrument n'était pas localement situé proche des sources (relativement encombrantes), ce qui imposait

le transport du faisceau sur des distances de 5 m et plus, apportant ainsi une source de fluctuation du signal supplémentaire. De toute façon, l'incertitude des mesures est, dans ce cas particulier, inférieure à 0,1 cm^{-1} limite que nous nous étions fixée .

B. EXPERIENCE EFFECTUEE A L'AIDE D'UNE SOURCE PULSEE

La source laser que nous avons utilisée fonctionnant en impulsions est une source monomode asservie et balayable. Sa fréquence, tout comme celle du laser continu, a été accordée sur l'une ou l'autre des transitions D_1 et D_2 du sodium. Nous avons observé que la précision des mesures est environ deux fois moins bonne (0,06 à 0,07 Å) que celle obtenue avec les lasers fonctionnant en continu. Nous pouvons attribuer cette différence au fait que le rayonnement pulsé (qui est obtenu après amplification dans des cellules à colorant) est spatialement moins uniforme que le faisceau continu et que, de ce fait, les détecteurs sont plus sensibles à des micro-fluctuations de la position du faisceau. Ces fluctuations seraient certainement fortement réduites par l'utilisation d'une optique d'entrée utilisant une fibre optique placée au foyer d'un objectif.

CONCLUSION

CONCLUSION

Nous avons réalisé un instrument de mesure absolue de nombre d'ondes de rayonnement laser, que celui-ci fonctionne en régime continu ou impulsionnel. Il est relativement simple d'emploi et, surtout, complètement autonome en ce qui concerne la calibration ; aussi, cet instrument devrait pouvoir être utilisé avec profit dans beaucoup d'expériences mettant en oeuvre des lasers à colorant accordables (en particulier des lasers fonctionnant en impulsion).

Comme tout appareil de ce type, il est évidemment susceptible de perfectionnement. Notamment, comme nous l'avons déjà signalé, une optique d'entrée à fibre optique permettrait d'accroître la stabilité des signaux, donc la précision des mesures. D'autre part, moyennant quelques modifications minimes, il pourrait être utilisé dans une boucle d'asservissement de laser, afin de le piloter en fréquence.

L'augmentation de la résolution par adjonction d'un second sigmamètre est également envisageable. Cependant, cela le ferait changer de classe d'instruments. Il ferait partie des instruments qui nécessitent, pour leur calibration, une ou plusieurs raies de références, elles-mêmes stabilisées et qui sont, de ce fait, très délicats à utiliser.

REFERENCES

{1} - J.L. HALL et S.A. LEE, App. Phys. Lett. 29, 367 (1976)

- J. CACHENAUT, C. MAN, P. CEREZ, A. BRILLET, F. STOECKEL, A. JOURDAN, et F. HARTMANN, Rev. de Phys. Appl. 14, 685 (1979)

{2} - P. JUNCAR et J. PINARD, Opt. Commun. 14, 438 (1975)

- P. JUNCAR et J. PINARD, à paraître dans Rev. Sci. Instrum. 53, (7) Juil. (1982)

{3} - R.L. BYER, J. PAUL et M.D. DUCAN, Laser Spect. III, Springer-Verl., 414 (1977)

- N. KONISHI, T. SUZUKI, Y. TAIRA, H. KOTO et T. KASUYA, Appl. Phys. 25, 311 (1981)

{4} - J.J. SNYDER, Laser Spect. III, Springer Verl., 419 (1977)

- J.J. SNYDER, Proceedings of the Los Alamos Conference on Optics (1981)

{5} P. JUNCAR, Thèse de 3ème cycle, Orsay (1976)

{6} P. BOUSQUET, Spectroscopie Instrumentale, 188, Edition Dunod (1969)

{7} M. ABRAMOURITZ et I.A. STEGUM, Handbook of Mathematical Functions, 81, Edition Dover (1970)

ANNEXE

PAGE 001 MANO .SA:1 MANO

```
                                 NAM   MANO
        0102                     ORG   $0102
                                 OPT   S
                           ********************************
                           *PROGRAMME DE TRAITEMENT ET DE
                           *CALCUL DE L'APPAREIL M.A.N.C.
                           *MESUREUR ABSOLU DE
                           *NOMBRE D'ONDES
                           ********************************
                           *  DEFINITION DES ADRESSES
                           ********************************
                           *-ADRESSES DES REGISTRES
                           * DE PIA
              C020         ORA   EQU   $C020
              C020         DDRA  EQU   $C020
              C021         CRA   EQU   $C021
              C022         ORB   EQU   $C022
              C022         DDRB  EQU   $C022
              C023         CRB   EQU   $C023
                           *----ADRESSES DES REGISTRES
                           * DE DMAC
              C000         AR0   EQU   $C000
              C002         OC0   EQU   $C002
              C010         CR0   EQU   $C010
              C004         AR1   EQU   $C004
              C006         OC1   EQU   $C006
              C011         CR1   EQU   $C011
              C008         AR2   EQU   $C008
              C00A         OC2   EQU   $C00A
              C012         CR2   EQU   $C012
              C014         PR    EQU   $C014
              C015         ICR   EQU   $C015
              C016         DCHP  EQU   $C016
                           *-----ADRESSES DES EF
                           *DES OPERATION MATH.
              1980         FPADD EQU   $1980
              1994         FPSUB EQU   $1994
              1951         FPDIV EQU   $1951
              1925         FPMUL EQU   $1925
              [illegible]  [illegible] EQU [illegible]
              [illegible]  [illegible] EQU [illegible]
              [illegible]  [illegible] EQU [illegible]
              [illegible]  [illegible] EQU [illegible]
                           *-----ADRESSES DES DONNEES
              [illegible]  [illegible] EQU [illegible]
```

```
00460 00046            D100      COS    EQU    $D100
00470 00047            D101      SIN    EQU    $D101
00480 00048            0800      NBDATA EQU    $800
00490 00049            FE00      CONST  EQU    $FE00
00500 00050            FE06      DEMI   EQU    $FE06
00510 00051            FE0C      UN     EQU    $FE0C
00520 00052            FE12      DEMIPI EQU    $FE12
00530 00053            FE18      PI     EQU    $FE18
00540 00054            FE1E      DEUXPI EQU    $FE1E
00550 00055            FE24      SIGLAS EQU    $FE24
00560 00056            FE2A      SIG2   EQU    $FE2A
00570 00057            FE30      DELSIG EQU    $FE30
00580 00058            FE36      PHI0   EQU    $FE36
00590 00059            FE3C      SPECTR EQU    $FE3C
00600 00060            FE44      SBLANC EQU    $FE44
00610 00061            FE4C      NENEON EQU    $FE4C
00620 00062            FE54      LASER  EQU    $FE54
00630 00063            FE5C      K10K   EQU    $FE5C
00640 00064                      *ADRESSES DES MEMOIRES DE TRAVAIL
00650 00065 D102       0006      MEMRA  RMB    6
00660 00066 D108       0006      IXE    RMB    6
00670 00067 D10E       0006      RESUT  RMB    6
00680 00068 D114       0006      OP1    RMB    6
00690 00069 D11A       0006      OP2    RMB    6
00700 00070 D120       0006      EPS1   RMB    6
00710 00071 D126       0006      EPS2   RMB    6
00720 00072 D12C       0006      SIGMA0 RMB    6
00730 00073 D132       0006      DELTA0 RMB    6
00740 00074 D138       0006      [illegible] RMB 6
00750 00075 D13E       000[illegible] [illegible] RMB 6
[illegible] D144       0002      [illegible] RMB 2
[illegible] D146       0002      [illegible] RMB 2
[illegible] D148       0004      [illegible] RMB [illegible]
[illegible] [illegible] 0001     FLAG   RMB    1
[illegible] [illegible] 0001     FLAG1  RMB    1
[illegible] [illegible] 0001     ZERO   RMB    1
[illegible] [illegible] 0004     DIGIT  RMB    [illegible]
[illegible] [illegible] 0002     [illegible] RMB [illegible]
[illegible] [illegible] [illegible] [illegible] RMB [illegible]
[illegible] [illegible] [illegible] [illegible] RMB [illegible]
[illegible]                      **************************************
[illegible]                      * FONCTIONS DES ENTREES SORTIES
[illegible]                      *ON PIA
[illegible]                      *[illegible] DATA PRET [illegible] ET [illegible]
[illegible]                      *[illegible] [illegible] [illegible]
```

```
                     *PA2 MODE CONTROLE (S/H)
                     *PA3 CONVER COMMANDE COS
                     *PA4 CONVER COMMANDE SIN
                     *PA5 COMMANDE DE LA PENTE
                     *PA6 CHOIX DE L'UNITE DU RESULTA
                     *PA7 CHOIX DU MODE DE FONCTIONNEMENT
                     *CA2 START BARETTE
                     *PB0 MODE CIRCUIT D'AFFICHAGE
                     *PB1 RELAI SOURCE BLANCHE
                     *PB2 RELAI SOURCE SPECTRALE Hg
                     *PB3 RELAI LASER He-Ne
                     *CB2 ENTREE SPECTRO.
                     ***************************************
                     *     LE PROGRAMME PRINCIPAL
                     ***************************************
                     *   ETAPE A
                     **********
FDCE                        ORG    $FDCE
                     * POINTAGE DE LA PILE
                     * DU PROGRAMME
FDCE 10CE D0F0              LDS    #$D0F0
                     * PROGRAMMATION DU PIA
FDD2 CC   2704              LDD    #$2704
FDD5 FD   C020              STD    $C020    PORT A
FDD8 CC   FF34              LDD    #$FF34
FDDB FD   C022              STD    $C022    PORT B
FDDE 86   40                LDA    #$40
FDE0 B5   C020              BITA   $C020    TESTE DE MODE DU
FDE3 26   03   FDE8         BNE    MONITE
                     * BRANCHEMENT A L'ETAPE B
FDE5 7E   D904              JMP    $D904
                     *  BRANCHEMENT AU MONITEUR
FDE8 7E   F840       MONITE JMP    $F840
                     ************************
                     *  ETAPE B
                     ************************
D904                        ORG    $D904
D904 CC   [illegible]       LDD    #[illegible]
D907 FD   [illegible]       STD    $[illegible]
D90A CC   E000              LDD    #$E000
D90D BD   [illegible]       JSR    [illegible]    PROG. IMPR
D910 CC   [illegible]       LDD    #[illegible]
D913 8E   [illegible]       LDX    #SPECTR
                     * AFFICHAGE DE 'SPECTRE'
D916 BD   [illegible]       JSR    AFFICH
```

```
01360 00136  D9CE CC   D8BA          LDD   #$D8BA   COMMANDE :RELAIS
01370 00137                     *ATTENT DE "START ACQ."
01380 00138  D9D1 BD   DB46          JSR   INIT     CONTROLE PENTE
01390 00139                     * ACQUI.DU SIGNIAL
01400 00140                     * DE LA BARRETTE
01410 00141  D9D4 BD   DB5A          JSR   ACQBAR
01420 0014   D9D7 8E   E000         LDX   #$E000
01430 00143  D9DA CE   D7E0          LDU   #POINTM
01440 00144  D9DD 108E 0800          LDY   #NBDATA ,FILTRAGE DES
01450 00145  D9E1 BD   DBAD         JSR   FILTRE   DONNEES
01460 00146  D9E4 7F   D140          CLR   FLAG
01470 00147  D9E7 BD   DBC3          JSR   DNPM     DNPM AVEC L'OPT.
01480 00148                     * MEMORISATION DES ADRESSES
01490 00149                    * DES RAIES DE REFERENCE
01500 00150  D9EA FC   D7E0          LDD   POINTM
01510 00151  D9ED FD   D15A          STD   ADRM1
01520 00152  D9F0 FC   D7E2          LDD   POINTM+2
01530 00153  D9F3 FD   D15C          STD   ADRM1+2
01540 00154  D9F6 EC   5C            LDD   -4,U
01550 00155  D9F8 FD   D15E          STD   ADRM2
01560 00156  D9FB EC   5E            LDD   -2,U
01570 00157  D9FD FD   D160          STD   ADRM2+2
01580 00158                     ************************
01590 00159                     *    ETAPE C
01600 00160                     ************************
01610 00161  DA00 CC   E000          LDD   #$E000
01620 00162  DA03 BD   DC5[illegible]          JSR   [illegible]
01630 00163  DA06 CC   05B4          LDD   #$05B4
01640 00164  DA09 CE   FE44          LDU   #[illegible]
01650 00165  DA0C BD   0F7A          JSR   AFFD[illegible]
01660 00166  DA0F CC   FEFF          LDD   #$FEFF   COMT,PENTE=1
01670 00167  DA12 BD   DB46          JSR   INIT
01680 00168  DA15 BD   DB5A          JSR   ACQBAR   ACQ.DU SPECTRE CA
01690 00169  DA18 CE   D7E0          LDU   #POINTM
01700 00170  DA1B BE   D15A          LDX   ADRM1
01710 00171  DA1E 108E 0010          LDY   #16
01720 00172  DA22 BD   DC[illegible]          JSR   [illegible]
01730 00173  DA25 8E   D7E[illegible]          LDX   #POINT[illegible]
01740 00174  DA28 CE   D15[illegible]          LDU   #ADRM1
01750 00175  DA2B BD   DF[illegible]          JSR   CALPPI   [illegible]
01760 00176  DA2E CE   D1[illegible]          LDU   #CPI
01770 00177  DA31 108E D1[illegible]          LDY   #CPI[illegible]
01780 00178  DA35 BD   DC[illegible]          JSR   TRP      [illegible]
01790 00179  DA38 7C   D140          INC   FLAG
01800 00180  DA3B BE   D7E[illegible]          LDX   POINTM
```

```
01810 00181  DA3E 30    01             LEAX   1,X
01820 00182  DA40 BF    D158           STX    BARETE   SAVE ADR.M1,1
01830 00183  DA43 FC    015E           LDD    ADRM2
01840 00184  DA46 B3    D7E0           SUBD   POINTM
01850 00185  DA49 5C                   INCB
01860 00186  DA4A 1F    02             TFR    D,Y
01870 00187  DA4C CE    D7E0           LDU    #POINTM
01880 00188  DA4F BD    DBC2           JSR    DNPM
01890 00189  DA52 8E    D7E0           LDX    #POINTM
01900 00190  DA55 CE    015E           LDU    #ADRM2
01910 00191  DA58 BD    DF28           JSR    CALFRC   FRAC2--->OP2
01920 00192  DA5B 8E    D11A           LDX    #OP2
01930 00193  DA5E 108E  D128           LDY    #EPS1
01940 00194  DA62 BD    D996           JSR    FPSUB    EPS1+EPS--->OP2
01950 00195                     * CAL.DE N+FRAC1+FRAC2
01960 00196  DA65 BD    DB35           JSR    CALNBM
01970 00197                     ******************
01980 00198                     *    ETAPE D
01990 00199                     ******************
02000 00200  DA68 CC    F000           LDD    #$F000
02010 00201  DA6B BD    DC97           JSR    DMAC
02020 00202  DA6E 86    3C             LDA    #$3C     FERMETURE DU
02030 00203  DA70 B7    C023           STA    CRB      RELAI DU SPECTRO
02040 00204  DA73 CC    0FBE           LDD    #$0FBE
02050 00205  DA76 CE    FE40           LDU    #NENEON
02060 00206  DA79 BD    DF7A           JSR    AFFDIG
02070 00207  DA7C CC    0D0A           LDD    #$0D0A
02080 00208  DA7F BD    DB46           JSR    INIT
02090 00209  DA82 BD    DB5F           JSR    ACQBAP
02100 00210  DA85 BD    DB70           JSR    ACQEIN
02110 00211  DA88 BD    D075           JSR    EPS
02120 00212  DA8B BD    DE9A           JSR    DELTA
02130 00213  DA8E CC    0FBE           LDD    #$0FBE
02140 00214  DA91 CE    FE54           LDU    #LASER
02150 00215  DA94 BD    DF7A           JSR    AFFDIG
02160 00216  DA97 CC    0D0A           LDD    #$0D0A
02170 00217  DA9A BD    DB46           JSR    INIT
02180 00218  DA9D 1C    EF             ANDCC  #$EF
02190 00219                     ******************
02200 00220                     *    ETAPE E
02210 00221                     ******************
02220 00222  DA9F CC    F000    MESURE LDD    #$F000
02230 00223  DAA2 BD    DC97           JSR    DMAC
02240 00224  DAA5 BD    DB5F           JSR    ACQBAP
02250 00225  DAA8 BD    DB70           JSR    ACQEIN
```

```
02260 00226 DAAB CE   D7E0            LDU   #POINTM
02270 00227 DAAE 8E   F000            LDX   #$F000
02280 00228 DAB1 108E 0000            LDY   #NBDATA
02290 00229 DAB5 BD   DBAD            JSR   FILTRE
02300 00230 DAB8 7F   D14C            CLR   FLAG
02310 00231 DABB BD   DBC3            JSR   DNPM
02320 00232 DABE FC   D7E0            LDD   POINTM
02330 00233 DAC1 80   10              SUBA  #$10
02340 00234 DAC3 FD   D7E0            STD   POINTM
02350 00235 DAC6 B3   D158            SUBD  BARETE
02360 00236 DAC9 5C                   INCB
02370 00237 DACA 1F   02              TFR   D,Y
02380 00238 DACC BE   D158            LDX   BARETE
02390 00239 DACF CE   D7E3            LDU   #POINTM+3
02400 00240 DAD2 7C   D14C            INC   FLAG
02410 00241 DAD5 BD   DBC3            JSR   DNPM
02420 00242 DAD8 8E   D7E3            LDX   #POINTM+3
02430 00243 DADB CE   D7E0            LDU   #POINTM
02440 00244 DADE BD   DF20            JSR   CALFRC   FRC2--->OP2
02450 00245 DAE1 8E   D11A            LDX   #OP2
02460 00246 DAE4 108E D126            LDY   #EPS1
02470 00247 DAE8 BD   [illegible]     JSR   FPSUB    FRC1+FRC2--->OP2
02480 00248 DAEB BD   [illegible]     JSR   CALWBK
02490 00249 DAEE BD   D075            JSR   EPS
02500 00250 DAF1 BD   DEFF            JSR   SIGMA
02510 00251 DAF4 86   80              LDA   #$80
02520 00252 DAF6 B5   [illegible]     BITA  OP2
02530 00253 DAF9 27   05   DB00       BEQ   ANGETM
02540 00254 DAFB 8E   [illegible]     LDX   #SIGMA0
02550 00255 DAFE 20   29   DB29       BRA   NBOUCLE
02560 00256 DB00 B6   D131     ANGETM LDA   SIGMA0+5
02570 00257 DB03 80   06              SUBA  #6
02580 00258 DB05 B7   D131            STA   SIGMA0+5
[illegible]                           LDU   #[illegible]
[illegible]                           LDY   #OP1
[illegible]                           JSR   TFF
[illegible]                           LDU   #SIGMA0
[illegible]                           LDY   #OP2
[illegible]                           JSR   TFF
[illegible]                           LDX   #OP1
[illegible]                           LDY   #RESULT
[illegible]                           JSR   [illegible]
[illegible]                           LDX   #RESULT
[illegible]                   NBOUCLE LDU   #[illegible]
[illegible]                           LDX   #[illegible]
```

```
02710 00271 D82F BD   DF4B         JSR    AFFICH
02720 00272 D832 7E   DA9F         JMP    MESURE
02730 00273                    ***************************
02740 00274                    *  LES SOUS-PROGRAMMES
02750 00275                    ***************************
02760 00276                    *
02770 00277                    *  SP "CALNBM"
02780 00278                    **************
02790 00279 D835 8E   D148     CALNBM LDX    #NBM
02800 00280 D838 108E D102            LDY    #NBMAX
02810 00281 D83C BD   DEF5            JSR    CONVER
02820 00282 D83F 8E   D11A            LDX    #OP2
02830 00283 D842 BD   D980            JSR    FPADD    RESULTAT --->NBM
02840 00284 D845 39                   RTS
02850 00285                    *  SP POUR "START ACQ."
02860 00286                    *************************
02870 00287 D846 B7   C020     INIT   STA    CRA
02880 00288 D849 B6   C021     TST0   LDA    CRA
02890 00289 D84C 2C   FB   D849       BGE    TST0
02900 00290 D84E 8E   7FFF            LDX    #$7FFF
02910 00291 D851 30   1F       REBON  LEAX   -1,X
02920 00292 D853 12                   NOP
02930 00293 D854 26   FB   D851       BNE    REBON
02940 00294 D856 F7   C020            STB    CRA
02950 00295 D859 39                   RTS
02960 00296                    *  SP "ACQBAR"
02970 00297                    ***************
02980 00298 D85A 86   3C       ACQBAR LDA    #$3C
02990 00299 D85C B7   C021            STA    CRA
03000 00300 D85F B6   C020            LDA    ORA      START BARETI
03010 00301 D862 12                   NOP
03020 00302 D863 B6   C019     BOUCLE LDA    CRB
03030 00303 D866 84   80              ANDA   #$80
03040 00304 D868 27   F9   D863       BEQ    BOUCLE
03050 00305 D86A 86   04              LDA    #4
03060 00306 D86C B7   C021            STA    CRA
03070 00307 D86F 39                   RTS
03080 00308                    *ACQUISITION DE EDN ET CDE
03090 00309                    *COMMANDE DES E S
03100 00310 D870 86   3[illegible] ACQEDN LDA #$3[illegible]
03110 00311 D872 B7   C020            STA    CRA      PA0=1
03120 00312 D875 12                   NOP
03130 00313 D876 86   3[illegible]    LDA    #$3[illegible]
03140 00314 D878 B7   C020            STA    CRA      END OF PULSE
03150 00315                    *CONVERT COMMANDE CDE
```

```
03160 00316  DB7B 7F   C021             CLR   CRA
03170 00317  DB7E 86   2F               LDA   #$2F     PA3=0 OUT
03180 00318  DB80 B7   C020             STA   DDRA     STAR OF PULSE
03190 00319  DB83 86   27               LDA   #$27     PA3=1 IN
03200 00320  DB85 B7   C020             STA   DDRA     END OF PULSE
03210 00321  DB88 12                    NOP
03220 00322  DB89 B6   C011       BCL0  LDA   CR1
03230 00323  DB8C 84   80               ANDA  #$80
03240 00324  DB8E 27   F9   DB89        BEQ   BC0
03250 00325  DB90 86   14               LDA   #20      DELAI=(A)*5 Micr
03260 00326  DB92 4A              DELAI DECA
03270 00327  DB93 26   FD   DB92        BNE   DELAI
03280 00328                       *CONVER COMMANDE SIN
03290 00329  DB95 86   37               LDA   #$37     PA4=0 OUT
03300 00330  DB97 B7   C020             STA   DDRA     START PULSE
03310 00331  DB9A 86   27               LDA   #$27     PA4=1 IN
03320 00332  DB9C B7   C020             STA   DDRA     END OF PULSE
03330 00333  DB9F 12                    NOP
03340 00334  DBA0 B6   C012       BCL2  LDA   CR2
03350 00335  DBA3 84   80               ANDA  #$80
03360 00336  DBA5 27   F9   DBA0        BEQ   BCL2
03370 00337  DBA7 86   04               LDA   #4
03380 00338  DBA9 B7   C021             STA   CRA
03390 00339  DBAC 39                    RTS
03400 00340                       *  SP "FILTRE"
03410 00341                       ******************
03420 00342  DBAD 34   30         FILTRE PSHS X,Y
03430 00343  DBAF 86   07         TOTO  LDA   #7
03440 00344  DBB1 31   3F               LEAY  -1,Y
03450 00345  DBB3 27   0C   DBC1        BEQ   TITI
03460 00346  DBB5 6D   80               TST   X+
03470 00347  DBB7 2D   F6   DBAF        BLT   TOTO
03480 00348  DBB9 A0   1F               SUBA  -1,X
03490 00349  DBBB 2D   F2   DBAF        BLT   TOTO
03500 00350  DBBD 6F   1F               CLR   -1,X
03510 00351  DBBF 20   EE   DBAF        BRA   TOTO
03520 00352  DBC1 35   B0         TITI  PULS  X,Y,PC
03530 00353                       *  SP [illegible]
03540 00354                       * [illegible]
03550 00355                       *MAX ET LEURS POSITIONS
03560 00356                       *IL SP POSSEDE DEUX OPTIONS
03570 00357                       *OPTION 0: DETERMINATION DES POSITIONS
03580 00358                       *          DE TOUS LES MAX
03590 00359                       *OPTION 1: COMPTAGE DES MAX ET
03600 00360                       *          DETERMINATION DES POSITIONS
```

```
                            *          DES 3 DERNIERS MAX.
                            *    POUR APPELER CE PROGRAMME IL FAUT:
                            * -METTRE L ADRESSE DE LA PREMIERE
                            *    DONNEE DANS "X"
                            * -METTRE LE NOMBRE DES DONNEES DANS Y
                            * -POINTER USUR : ZONE VIDE DU MEMOIRE
                            * -RESERVER 1 OCTET POUR "FLAG",1 OCTET
                            *  POUR "NBMX",DEUX OCTETS POUR "MAX"
                            * -METTRE "1" DANS "FLAG"  OPTION"1",
                            *   "0" POUR OPT0
                            *   EN SORTIE NOUS AVONS POUR L OPTION
                            *  "1" .LE NOMBRE MAXIMUM DANS "NBMX"
                            *       .LES ADRESSES DE 3 DERNIERS MAX
                            *     A PARTIRE DE L'ADRESSE QU' NOUS
                            *     AVONS POINTER "U"
                            *  "0" .LE NOMBRE DE MAX DANS "NBMX"
                            *       .L ADRESSE DE DERNIER MAXIMUM
                            *          DANS "MAX"
                            ****************************************
0E00 7F    0144        DMAX    CLR    NBMX
0E03 7F    0145                CLR    NBMX+1
0E06 A6    80          P1      LDA    ,X+
0E08 A1    3F                  CMPA   -1,Y
0E0A 27    2E   0E3A           BEQ    SUITE2
0E0C A0    84                  SUBA   ,X
0E0E 2A    F6   0E06           BPL    P1
0E10 A6    80          ETP1    LDA    ,X+
0E12 A1    3F                  CMPA   -1,Y
0E14 27    21   0E37           BEQ    SUITE2
0E16 A0    84                  SUBA   ,X
0E18 26    04   0E1E           BNE    ECH
0E1A A6    84                  LDA    ,X
0E1C A0    01                  SUBA   1,X
0E1E 2F    F0   0E10 ECH       BLE    ETP1
0E20 34    10                  PSHS   X
0E22 BE    0144                LDX    NBMX
0E25 30    01                  LEAX   1,X
0E27 BF    0144                STX    NBMX
0E2A 35    10                  PULS   X
0E2C 7D    0141                TST    FLAG
0E2F 27    06   0E37           BEQ    OPT0
0E31 BF    0142                STX    MAX
0E34 7E    0E06                JMP    P1
0E37 7D    0141        SUITE2  TST    FLAG
0E3A 26    01   0E3D           BNE    SUITE3
```

```
04060 00406  DBFF 39                FIN    RTS
04070 00407  DC00 BE    D146        SUITE6 LDX    MAX
04080 00408  DC03 30    1E                 LEAX   -2,X
04090 00409  DC05 FC    D144               LDD    NEMX
04100 00410  DC08 FD    D146               STD    NEM
04110 00411  DC0B CC    FFFE               LDD    #$FFFE
04120 00412  DC0E FD    D144               STD    NEMX
04130 00413  DC11 7F    D14C               CLR    FLAG
04140 00414  DC14 108E  0019               LDY    #25
04150 00415  DC18 BD    DBC9               JSR    P2
04160 00416  DC1B 39                       RTS
04170 00417  DC1C 34    60          OPT2   PSHS   Y,U
04180 00418  DC1E 7F    D14D               CLR    FLAG1
04190 00419  DC21 E6    84                 LDB    ,X
04200 00420  DC23 108E  D10E               LDY    #RESUT
04210 00421  DC27 BD    DFA8               JSR    FORMAT
04220 00422  DC2A E6    1F                 LDB    -1,X
04230 00423  DC2C 31    26                 LEAY   6,Y
04240 00424  DC2E BD    DFA8               JSR    FORMAT
04250 00425  DC31 E6    1E                 LDB    -2,X
04260 00426  DC33 31    26                 LEAY   6,Y
04270 00427  DC35 BD    DFA8               JSR    FORMAT
04280 00428  DC38 34    10                 PSHS   X
04290 00429  DC3A 1F    21                 TFR    Y,X
04300 00430  DC3C 31    3A                 LEAY   -6,Y
04310 00431  DC3E BD    D956               JSR    FPSUB
04320 00432  DC41 30    14                 LEAX   -12,X
04330 00433  DC43 BD    D956               JSR    FPSUB
04340 00434  DC46 1F    13                 TFR    X,U
04350 00435  DC48 BD    DC0E               JSR    TRF
04360 00436  DC4B 1F    21                 TFR    Y,X
04370 00437  DC4D 31    26                 LEAY   6,Y
04380 00438  DC4F BD    D956               JSR    FPSUB
04390 00439  DC52 30    14                 LEAX   -12,X
04400 00440  DC54 BD    D9E1               JSR    FPADD
04410 00441  DC57 1F    12                 TFR    X,Y
04420 00442  DC59 30    06                 LEAX   6,X
04430 00443  DC5B BD    D9F1               JSR    FPDIV
04440 00444  DC5E CE    FE04               LDU    #LEM1
04450 00445  DC61 1F    12                 TFR    [illegible]
04460 00446  DC63 BD    DC0E               JSR    TRF
04470 00447  DC66 108E  D10F               LDY    #DP1
04480 00448  DC6A 30    1F                 LEAX   [illegible]
04490 00449  DC6C BD    DC0E               JSR    [illegible]
04500 00450  DC6F 1F    12                 TFR    [illegible]
```

```
DC71 A6    45                 LDA    5,U
DC73 40                       NEGA
DC74 27    03   DC79          BEQ    SSS
DC76 BD    D822               JSR    EXPO31
DC79 35    70           SSS   PULS   Y,U,X
DC7B 30    1F                 LEAX   -1,X
DC7D AF    C1                 STX    U++
DC7F 30    01                 LEAX   1,X
DC81 FC    D11A               LDD    OP2
DC84 ED    C1                 STD    U++
DC86 7D    D144               TST    NBMX
DC89 27    03   DC8E          BEQ    *+5
DC8B 7E    DBC9               JMP    P2
DC8E 7D    D145               TST    NBMX+1
DC91 27    03   DC96          BEQ    *+5
DC93 7E    DBC9               JMP    P2
DC96 39                       RTS
                        *  SP "DMAC"
                        ***************
DC97 FD    D000         DMAC  STD    AR0
DC9A 86    02                 LDA    #2
DC9C B7    D010               STA    CR0
DC9F B7    D011               STA    CR1
DCA2 B7    D012               STA    CR2
DCA5 86    07                 LDA    #7
DCA7 B7    D014               STA    PR
DCAA 7F    D015               CLR    [illegible]
DCAD 86    [illegible]        LDA    [illegible]
DCAF B7    D016               STA    [illegible]
DCB2 CC    [illegible]        LDD    [illegible]
DCB5 FD    [illegible]        STD    AR1
DCB8 CC    [illegible]        LDD    [illegible]
DCBB FD    [illegible]        STD    AR2
DCBE CC    [illegible]        LDD    [illegible]
DCC1 FD    [illegible]        STD    [illegible]
DCC4 CC    [illegible]        LDD    #1
DCC7 FD    [illegible]        STD    [illegible]
DCCA FD    [illegible]        STD    [illegible]
DCCD 39                       RTS
                        * [illegible]
                        * [illegible]
                        * [illegible]
                        * [illegible]
                        ***************
DCCE EC    C4           [illegible]   LDD    ,U
```

```
04960 00496  DCD0 ED   A4               STD    Y
04970 00497  DCD2 EC   42               LDD    2,U
04980 00498  DCD4 ED   22               STD    2,Y
04990 00499  DCD6 EC   44               LDD    4,U
05000 00500  DCD8 ED   24               STD    4,Y
05010 00501  DCDA 39                    RTS
05020 00502                      * SP POUR CALCULER LA
05030 00503                      * VALEUR ENTIERE D'UN NOMBRE EN VF
05040 00504                      *********************************
05050 00505  DCDB CC   0009      COVENT LDD    #9
05060 00506  DCDE 6D   25               TST    5,Y
05070 00507  DCE0 2F   08   DCEA        BLE    LOOP8
05080 00508  DCE2 E0   25               SUBB   5,Y
05090 00509  DCE4 2F   10   DCF6        BLE    FIN8
05100 00510  DCE6 1F   01               TFR    D,X
05110 00511  DCE8 1F   23               TFR    Y,U
05120 00512  DCEA 6C   25        LOOP8  INC    5,Y
05130 00513  DCEC BD   D6AC             JSR    SD1DGT
05140 00514  DCEF 30   1F               LEAX   -1,X
05150 00515  DCF1 26   F7   DCEA        BNE    LOOP8
05160 00516  DCF3 BD   D861             JSR    $D861
05170 00517  DCF6 39             FIN8   RTS
05180 00518                      *SOUS-PROGRAMME BINDEC
05190 00519                      *CE PROGRAMME CONVERTIE UN NB
05200 00520                      *NO05200 00520                  *NON SIGNE
 BINAIRE DE 16-BITS
05210 00521                      *EN 5-DIGITS BCD
05220 00522                      *ACC."D"=VAL. BIN.
05230 00523                      *A"Y" ---> ZONE RESULTAT
05240 00524                      ********************************
05250 00525  DCF7 34   76        BINBCD PSHS   A,B,X,Y,U
05260 00526  DCF9 30   8C 215F          LEAX   K10,PCR
05270 00527  DCFC CE   0001             LDU    #1
05280 00528  DD00 6F   A4        CHDEC1 CLR    ,Y
05290 00529  DD02 A3   84        CHDEC2 SUBD   ,X
05300 00530  DD04 25   04   DD0A        BCS    CHDEC3
05310 00531  DD06 6C   A4               INC    ,Y
05320 00532  DD08 20   F8   DD02        BRA    CHDEC2
05330 00533  DD0A E3   81        CHDEC3 ADDD   ,X++
05340 00534  [illegible] [illegible]    [illegible] #1
05350 00535  [illegible] [illegible] [illegible] BNE [illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]
```

```
05410 00541  D01C 33   41         DECAL  LEAU  1,U
05420 00542  D01E 34   06                PSHS  D
05430 00543  D020 86   04                LDA   #4
05440 00544  D022 68   A4         LSL    LSL   0,Y
05450 00545  D024 4A                     DECA
05460 00546  D025 26   FB   D022         BNE   LSL
05470 00547  D027 35   06                PULS  D
05480 00548  D029 20   D7   D002         BRA   CVDEC2
05490 00549                       * SP "ARCTAN"
05500 00550                       * ARC TANG.(X)=X/(1+.28*X**2)+e(X)
05510 00551                       * POUR X COMPRIS ENTRE -1 ET +1
05520 00552                       * Ie(X)I<.005
05530 00553                       * POUR L'UTILISER, ON CHARGE X DANS :
05540 00554                       * "IXE".LE RESULTAT ET DANS
05550 00555                       * "EPSO"
05560 00556                       ***********************************
05570 00557  D02B CE   D108       ARCTAN LDU   #IXE
05580 00558  D02E 108E D114              LDY   #OP1
05590 00559  D032 BD   DCCE              JSR   TRF
05600 00560  D035 108E D11A              LDY   #OP2
05610 00561  D039 BD   DCCE              JSR   TRF
05620 00562  D03C 8E   D114              LDX   #OP1
05630 00563  D03F 108E D10E              LDY   #RESLT
05640 00564  D043 BD   D92E              JSR   FPMUL    CALCUL DE X**2
05650 00565  D046 CE   FE00              LDU   #CONST
05660 00566  D049 108E D114              LDY   #OP1
05670 00567  D04D BD   DCCE              JSR   TRF
05680 00568  D050 CE   D10E              LDU   #RESLT
05690 00569  D053 108E D11A              LDY   #OP2
05700 00570  D057 BD   DCCE              JSR   TRF
05710 00571  D05A 8E   D114              LDX   #OP1
05720 00572  D05D 108E D10E              LDY   #RESLT
05730 00573  D061 BD   D92E              JSR   FPMUL    .28*X**2
05740 00574  D064 8E   FE0[illegible]    LD[illegible]  #U[illegible]
05750 00575  D067 BD   [illegible]       JSR   FPADD    1+.28*X**2
05760 00576  D06A CE   D108              LDU   #IXE
05770 00577  D06D 108E [illegible]       LDY   #EPSO
05780 00578  D071 BD   [illegible]       JSR   FPDIV
05790 00579  D074 39                     RTS
05800 00580                       *Le programme EPS calcule la fraction
05810 00581                       *a partir de deux quantites :
05820 00582                       *      A=DIVIDENDE.
05830 00583                       *      B=DIVISEUR
05840 00584  D075 108E D10E       EPS    LDY   #SIGNE
05850 00585  D079 [illegible]  [illegible]  LDB  [illegible]
```

```
05860 00586 DD7C BD   DF8D            JSR   CONVSC
05870 00587 DD7F 108E D13E            LDY   #COSIN
05880 00588 DD83 F6   D100            LDB   COS
05890 00589 DD86 BD   DF8D            JSR   CONVSC
05900 00590 DD89 1F   23              TFR   Y,U
05910 00591 DD8B 108E D114            LDY   #OP1
05920 00592 DD8F BD   DCCE            JSR   TRF      COSIN ---> OP1
05930 00593 DD92 33   5A              LEAU  -6,U
05940 00594 DD94 31   26              LEAY  6,Y
05950 00595 DD96 BD   DCCE            JSR   TRF      SINUS ---> OP2
05960 00596 DD99 7D   D101            TST   SIN
05970 00597 DD9C 1F   23              TFR   Y,U
05980 00598 DD9E 2B   03   DDA3       BMI   SINPLS
05990 00599 DDA0 BD   D63B            JSR   CPL100
06000 00600 DDA3 7D   D100     SINPLS TST   COS
06010 00601 DDA6 2B   06   DDAE       BMI   COSPLS
06020 00602 DDA8 CE   D114            LDU   #OP1
06030 00603 DDAB BD   D63B            JSR   CPL100
06040 00604 DDAE 8E   D114     COSPLS LDX   #OP1
06050 00605 DDB1 BD   D936            JSR   FPSUB    ABS(COS-SIN)
06060 00606 DDB4 7D   D114            TST   OP1
06070 00607 DDB7 2C   2B   DDE4       BGE   PLUS     BRANCHE SI +,0
06080 00608 DDB9 1F   12              TFR   X,Y
06090 00609 DDBB CE   D13E            LDU   #COSIN
06100 00610 DDBE BD   DCCE            JSR   TRF      COSIN ---> OP1
06110 00611 DDC1 33   5A              LEAU  -6,U
06120 00612 DDC3 31   26              LEAY  6,Y
06130 00613 DDC5 BD   DCCE            JSR   TRF
06140 00614 DDC8 108E D102            LDY   #IAE
06150 00615 DDCC BD   D951            JSR   FPDIV    COS/SIN ---> IAE
06160 00616 DDCF BD   DD25            JSR   ARCTAN   OP1 ---> ERG
06170 00617 DDD2 8E   FE12            LDX   #[illegible]
06180 00618 DDD5 1F   23              TFR   Y,U
06190 00619 DDD7 BD   D63B            JSR   CPL100
06200 00620 DDDA BD   D9[illegible]   JSR   FPADD    [illegible] ---> IAE
06210 00621 DDDD 7D   D101            TST   SIN
06220 00622 DDE0 2B   1F   DE01       BMI   ET3
06230 00623 DDE2 20   1D   DE01       BRA   ET1
06240 00624 DDE4 8E   D108     PLUS   LDX   #[illegible]
06250 00625 DDE7 108E D102            LDY   #IAE
06260 00626 DDEB BD   D951            JSR   FPDIV    SIN/COS ---> IAE
06270 00627 DDEE BD   DD25            JSR   ARCTAN   OP1 ---> ERG
06280 00628 DDF1 7D   D100            TST   COS
06290 00629 DDF4 2B   41   DE37       BMI   ET2      COS <= 0
06300 00630 DDF6 8E   FE13     ET1    LDX   #P1
```

```
06310 00631  DDF9 BD   D98D             JSR    FPADD
06320 00632  DDFC CE   FE1E       ST0   LDU    #DEUXPI
06330 00633  DDFF 108E D11A             LDY    #OP2
06340 00634  DE03 BD   DCCE             JSR    TRF
06350 00635  DE06 CE   D126             LDU    #EPS0
06360 00636  DE09 31   3A               LEAY   -6,Y
06370 00637  DE0B BD   DCCE             JSR    TRF
06380 00638  DE0E 1F   21               TFR    Y,X
06390 00639  DE10 1F   32               TFR    U,Y
06400 00640  DE12 BD   D951             JSR    FPDIV   EPS0/2PI--->EPS0
06410 00641  DE15 BD   D83B             JSR    CPL100
06420 00642  DE18 34   60               PSHS   Y,U
06430 00643  DE1A CE   FE36             LDU    #PHI0
06440 00644  DE1D 108E D108             LDY    #IXE
06450 00645  DE21 BD   DCCE             JSR    TRF
06460 00646  DE24 1F   21               TFR    Y,X
06470 00647  DE26 35   60               PULS   Y,U
06480 00648  DE28 BD   D98D             JSR    FPADD
06490 00649  DE2B 7D   D126             TST    EPS0
06500 00650  DE2E 2C   06   DE36        BGE    RTS0
06510 00651  DE30 8E   FE0C             LDX    #UN
06520 00652  DE33 BD   D98D             JSR    FPADD
06530 00653  DE36 39              RTS0  RTS
06540 00654  DE37 7D   D126       ST2   TST    EPS0
06550 00655  DE3A 2C   C0   DDFC        BGE    ST0
06560 00656  DE3C 8E   FE1E             LDX    #DEUXPI
06570 00657  DE3F 108E D126             LDY    #EPS0
06580 00658  DE43 BD   D98D             JSR    FPADD
06590 00659  DE46 20   B4   DDFC        BRA    ST0
06600 00660                       * SP "NETCAR"
06610 00661                       * IL PERMET DE DETERMINER
06620 00661                       * L'ORDRE D'INTERFERENCE
06630 00662                       ****************************************
06640 00664  DE49 108E D114       NETCAR LDY   #OP1
06650 00665  DE4D BD   DCCE             JSR    TRF     [illegible] ----> [illegible]
06660 00666  DE50 1F   21               TFR    Y,X
06670 00667  DE52 CE   D13E             LDU    #DELTAP
06680 00668  DE55 31   26               LEAY   6,Y
06690 00669  DE57 BD   DCCE             JSR    TRF     DELTA ---> [illegible]
06700 00670  DE5A 108E D13E             LDY    #RESULT
06710 00671  DE5E BD   D8E5             JSR    FPMUL   [illegible]DELTA----> [illegible]
06720 00672  DE61 1F   21               TFR    [illegible]
06730 00673  DE63 108E D126             LDY    #EPS0
06740 00674  DE67 BD   D946             JSR    FPDIV
06750 00675  DE6A CE   FEA6             LDU    #DEPI
```

```
06760 00676  DE6C 108E D114          LDY    #OP1
06770 00677  DE70 BD   DCDE          JSR    TRF
06780 00678  DE73 BD   D98D          JSR    FPADD
06790 00679  DE76 BD   DCD8          JSR    CDVENT
06800 00680  DE79 8E   D126          LDX    #EPS0
06810 00681  DE7C BD   D98D          JSR    FPADD
06820 00682  DE7F 39                 RTS
06830 00683                   * SP "DELTA"
06840 00684                   * Ce SP calcul la difference de marche
06850 00685                   *de l'interferometre
06860 00686                   *Les donnees sont:N+EPS'
06870 00687                   *                EPS
06880 00688                   *                SIGMA1,SIGMA2,SIGMA0
06890 00689                   ************************************
06900 00690  DE80 8E   D102   DELTA  LDX    #NEMAX
06910 00691  DE83 CE   FE30          LDU    #DELSIG
06920 00692  DE86 108E D108          LDY    #IXE
06930 00693  DE8A BD   DCDE          JSR    TRF
06940 00694  DE8D 108E D130          LDY    #DELTA0
06950 00695  DE91 BD   D951          JSR    FPDIV    N+EPS'/SIG2-SIG1
06960 00696  DE94 CE   FE24          LDU    #SIGLAS
06970 00697  DE97 BD   DE46          JSR    NBTOUF
06980 00698  DE9A CE   FE24          LDU    #SIGLAS
06990 00699  DE9D 108E D11A          LDY    #OP2
07000 00700  DEA1 BD   DCDE          JSR    TRF
07010 00701  DEA4 8E   D114          LDX    #OP1
07020 00702  DEA7 108E D130          LDY    #DELTA0
07030 00703  DEAB BD   D951          JSR    FPDIV
07040 00704  DEAE 39                 RTS
07050 00705                   * SP "SIGMA"
07060 00706                   *Le programme SIGMA calcul le nombre
07070 00707                   *d'ondes vacuum
07080 00708                   *Les donnees sont:NEMAX,DELTA0
07090 00709                   *            EPS1,SIGMA1
07100 00710                   ************************************
07110 00711  DEAF CE   D102   SIGMA  LDU    #NEMAX
07120 00712  DEB2 108E D114          LDY    #OP1
07130 00713  DEB6 BD   DCDE          JSR    TRF
07140 00714  DEB9 CE   D130          LDU    #DELTA0
07150 00715  DEBC 31   [illegible]   LEAY   [illegible]
07160 00716  DEBE BD   DCDE          JSR    TRF
07170 00717  DEC1 8E   D114          LDX    #OP1
07180 00718  DEC4 108E [illegible]   LDY    #SIGMA1
07190 00719  DEC8 BD   D951          JSR    FPDIV
07200 00720  DECB CE   [illegible]   LDU    #SIGMA0
```

```
DECE BD   D83B          JSR   CPL100
DED1 8E   FE2A          LDX   #SIG2
DED4 108E D12C          LDY   #SIGMA0
DED8 BD   D98D          JSR   FPADD
DEDB 1F   21            TFR   Y,X
DEDD BD   DE48          JSR   WBTOUR
DEE0 CE   D132          LDU   #DELTA0
DEE3 108E D11A          LDY   #OP2
DEE7 BD   DCDE          JSR   TRF
DEEA 8E   D114          LDX   #OP1
DEED 108E D12C          LDY   #SIGMA0
DEF1 BD   D951          JSR   FPDIV
DEF4 39                 RTS
                 * SP "CONVER" POUR
                 *REPRESENTER LES ADRESSES
                 *DES MAX EN VIRG.FLOT.
                 *INP:"X" POINTE L'ADRESSE
                 *    "Y" POINTE LA DESTINATION
DEF5 34   50     CONVER PSHS  X,U
DEF7 EC   84            LDD   ,X
DEF9 BD   DCF7          JSR   BINBCD
DEFC CC   0000          LDD   #0
DEFF ED   23            STD   3,Y
DF01 FD   D10A          STD   IXE+2
DF04 FD   D10C          STD   IXE+4
DF07 FD   D14A          STD   NEW+2
DF0A 86   05            LDA   #5
DF0C A7   25            STA   5,Y
DF0E EC   02            LDD   2,X
DF10 FD   D108          STD   IXE
DF13 8E   D108          LDX   #IXE
DF16 1F   13            TFR   X,U
DF18 BD   D83B          JSR   CPL100
DF1B BD   D980          JSR   FPADD
DF1E 35   D0            PULS  X,U,PC
                 *  SP "CALFRQ"
                 *****************
DF20 108E D114   CALFRQ LDY   #OP1      X0,1 ---->OP1
DF24 BD   DEF5          JSR   CONVER
DF27 30   04            LEAX  4,X
DF29 31   3A            LEAY  -6,Y
DF2B BD   DEF5          JSR   CONVER
DF2E 1F   21            TFR   Y,X       *Y---
DF30 108E D12E          LDY   #RESULT
DF34 BD   DEF5          JSR   CONVER    X1---> RESULT
```

```
DF37 8E   D114          LDX   #OP1
DF3A 108E D11A          LDY   #OP2
DF3E BD   D996          JSR   FPSUB    M2,2 -M2,1--->OP
DF41 8E   D10E          LDX   #RESUT
DF44 BD   D996          JSR   FPSUB    MS2-M2,1--->RESU
DF47 BD   D951          JSR   FPDIV    EPS--->OP2
DF4A 39                 RTS
                  * SP "AFFICH"
                  *REGISTRE D CONTIENT BITS CONTROL
                  *POINTER "X" SUR LES DATA FORMAT FPBCD
                  *POINTER "U" SUR LE TABLEAU DIGIT"
                  *FORMAT 0.X1,X2X3,X4X5,X6X7,X8X9,EXP
DF4B 34   06      AFFICH PSHS  D       SAVE "D"
DF4D A6   80            LDA   ,X+      OCTPF-->A
DF4F 8A   80            ORA   #$80
DF51 A7   C0            STA   ,U+
DF53 108E 0004          LDY   #4
DF57 A6   84      LOOP  LDA   ,X
DF59 E6   80            LDB   ,X+
DF5B 84   0F            ANDA  #$0F
DF5D 54                 LSRB
DF5E 54                 LSRB
DF5F 54                 LSRB
DF60 54                 LSRB
DF61 8A   80            ORA   #$80
DF63 CA   80            ORB   #$80
DF65 E7   C0            STB   ,U+
DF67 A7   C0            STA   ,U+
DF69 31   3F            LEAY  -1,Y
DF6B 26   EA   DF57     BNE   LOOP
DF6D 33   [illegible]   LEAU  -9,U
DF6F A6   C4            LDA   ,U
DF71 4A                 DECA
DF72 E6   C6            LDB   A,U
DF74 C4   7F            ANDB  #$7F
DF76 E7   C6            STB   A,U
DF78 35   86            PULS  [illegible]
                  * ENTREE DE SP "AFFICD"
                  * POUR AFFICHER
                  *U DIGIT POINTER FAP [illegible]
                  *D CONTIENT BITS CONTROL
[illegible] [illegible] [illegible] AFFICD STA [illegible]  START OF PULSE [illegible]
[illegible] [illegible] [illegible]        STB [illegible]  FOR END OF PULSE
[illegible] [illegible] 08                 LDB #8           AFFICH. DE 8 DIG
[illegible] [illegible] [illegible]        LEAX [illegible]
```

```
00110 00811 DF84 A6  C2       LOOP1 LDA   ,-U
00120 00812 DF86 B7  C00C           STA   $C00C
00130 00813 DF89 5A                 DECB
00140 00814 DF8A 26  F8  DF84       BNE   LOOP1
00150 00815 DF8C 39                 RTS
00160 00816                   * SP CONVSC
00170 00817                   *CONVSC ROUTINE DE MISE AU FORMAT
00180 00818                   *DES VALEURS SIN ET COS
00190 00819                   *ENTREE:X EN B ,Y POINTE ZONE RESULTAT
00200 00820                   *SORTIE:LA VALEUR POINTER PAR Y
00210 00821                   ********************************
00220 00822 DF8D 2B  0F  DF9E CONVSC BMI   PLUS1
00230 00823 DF8F 86  FF             LDA   #$FF
00240 00824 DF91 B7  D14D           STA   FLAG1
00250 00825 DF94 86  00             LDA   #$00
00260 00826 DF96 34  04 A0E0        SBA                 A-B ---> A
00270 00827 DF98 1F  89             TFR   A,B
00280 00828 DF9A 20  0A  DFA6       BRA   FORMAT
00290 00829 DF9C C4  7F       PLUS1 ANDB  #$7F
00300 00830 DF9E 26  03  DFA3       BNE   SS
00310 00831 DFA2 7F  D14E           CLR   ZERO
00320 00832 DFA5 7F  D14D     SS    CLR   FLAG1
00330 00833 DFA8 4F           FORMAT CLRA
00340 00834 DFA9 BD  DCF7           JSR   BINBCD
00350 00835 DFAC CC  0000           LDD   #0
00360 00836 DFAF ED  23             STD   3,Y
00370 00837 DFB1 7D  D14E           TST   ZERO
00380 00838 DFB4 26  0E  DFC4       BNE   SS1
00390 00839 DFB6 86  05             LDA   #5
00400 00840 DFB8 A7  25       SS1   STA   5,Y
00410 00841 DFBA 1F  23             TFR   Y,U
00420 00842 DFBC 7D  D14D           TST   FLAG1
00430 00843 DFBF 27  03  DFC4       BEQ   FIN1
00440 00844 DFC1 BD  D02B           JSR   CPL100
00450 00845 DFC4 BD  D061     FIN1  JSR   $D061
00460 00846 DFC7 39                 RTS
00470 00847                   *SP DE L'INTERRUPTION
00480 00848                   ********************
00490 00849 DFC8 1A  10       ARRET ORCC  #$10
00500 00850 DFCA CC  D80A           LDD   #$D80A
00510 00851 DFCD BD  DB46           JSR   INIT
00520 00852 DFD0 1C  EF             ANDCC #$EF
00530 00853 DFD2 3B                 RTI
00540 00854                         END
TOTAL ERRORS 00000--00000
```